

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



*PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GEODEZIJE*

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

**mag. KLEMEN KOZMUS TRAJKOVSKI,
univ. dipl. inž. geod.**

**RAZVOJ POSTOPKOV OBDELAVE OPAZOVANJ GNSS
ZA NAVIGACIJO OSEB V OTEŽENIH POGOJIH**

Doktorska disertacija štev.: 203

**DEVELOPMENT OF GNSS DATA PROCESSING
PROCEDURES FOR PEDESTRIAN NAVIGATION IN
CHALLENGING ENVIRONMENTS**

Doctoral thesis No.: 203

Temo doktorske disertacije je odobrila Komisija za doktorski študij na 27. redni seji dne 3. decembra 2009 po pooblastilu s 30. seje Senata Univerze v Ljubljani dne 20. januarja 2009 s področja geodezije in za mentorja imenovala izr. prof. dr. Bojana Stoparja in izr. prof. dr. Andreja Kosa za somentorja.

Ljubljana, 10. junij 2010

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi

doc.dr. Dušan Petrovič
izr.prof.dr. Bojan Stopar
izr.prof.dr. Krištof Oštir, ZRC SAZU in UL FGG
izr.prof.dr. Andrej Kos, UL FE

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo
na 3. redni seji dne 30. septembra 2009.

Komisijo za oceno doktorske disertacije v sestavi

izr.prof.dr. Bojan Stopar
izr.prof.dr. Andrej Kos, UL FE
doc.dr. Miran Kuhar
prof.dr. Janez Bešter, UL FE

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo
na 9. redni seji dne 31. marca 2010.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi

prof.dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG
izr.prof.dr. Bojan Stopar, mentor
izr.prof.dr. Andrej Kos, somentor, UL FE
doc.dr. Miran Kuhar
prof.dr. Janez Bešter, UL FE

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo
na 11. redni seji dne 26. maja 2010.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **mag. KLEMEN KOZMUS TRAJKOVSKI, univ. dipl. inž. geod.**,
izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom: **«RAZVOJ POSTOPKOV
OBDELAVE OPAZOVANJ GNSS ZA NAVIGACIJO OSEB V OTEŽENIH
POGOJIH»**.

Ljubljana, 10. junij 2010

.....
(podpis)

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

BIBLIOGRASKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK	528.28(043.3)
Avtor	Klemen Kozmus Trajkovski
Mentor	izr. prof. dr. Bojan Stopar, UL FGG
Somentor	izr. prof. dr. Andrej Kos, UL FE
Naslov	Razvoj postopkov obdelave opazovanj GNSS za navigacijo oseb v oteženih pogojih
Obseg in oprema	154 str., 3 pregl., 56 sl., 29 en.
Ključne besede	GPS, GNSS, DGPS, visoko občutljivi sprejemniki, kodna opazovanja, Dopplerjeva opazovanja, oteženi pogoji, obdelava opazovanj, določitev položaja, pogrešek večpotja

Izveček

Visoko občutljivi sprejemniki GPS so razširili uporabo sistemov GNSS na območja z oteženim sprejemom signalov s satelitov. Oteženi pogoji pomenijo oslabitev in odboj signalov. Sprejemniki dosežejo višjo občutljivost sprejema signalov z večjim številom korelatorjev in daljšim časom integracije. Pričujoča doktorska disertacija obravnava klasične metode obdelave opazovanj v normalnih pogojih za opazovanja v oteženih pogojih. Nekatere metode se dobro obnesejo tudi v težavnih pogojih, nekatere ne. Obdelava opazovanj v dinamičnih in hitro spremenljivih pogojih zahteva previdno in dosledno obravnavo, saj se v nasprotnem primeru lahko hitro pripeti velik pogrešek v določitvi položaja. Največji vpliv na končne rezultate ima pogrešek večpotja, ki ima še posebej velik vpliv na kodna opazovanja. V postopek določitve položaja smo zato vključili tudi Dopplerjeva opazovanja. Lastno razvit postopek določitve položaja v oteženih pogojih poleg znanih in uveljavljenih metod vključuje dodatne postopke, ki zagotavljajo višjo točnost in večjo zanesljivost položaja. Postopke obdelave smo preizkusili v različnih pogojih na statičnih in kinematičnih primerih. Pridobljene rezultate smo primerjali z rezultati obdelave, ki jih poda sprejemnik. Razvili smo tudi t.i. pogojni DGPS, postopek obdelave, ki diferencialno določa položaj samo na osnovi podatkov močnih signalov.

BIBLIOGRAPHIC–DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC	528.28(043.3)
Author	Klemen Kozmus Trajkovski
Supervisor	assoc. prof. dr. Bojan Stopar, UL FGG
Co-supervisor	assoc. prof. dr. Andrej Kos, UL FE
Title	Development of GNSS data processing procedures for pedestrian navigation in challenging environments
Notes	154 p., 3 tab., 56 fig., 29 eq.
Key words	GPS, GNSS, DGPS, high sensitivity receivers, code observations, Doppler observations, challenging environments, observation processing, positioning, multipath error

Abstract

High sensitivity GPS receivers have expanded the use of the GNSS to areas with difficult reception of the signals from the satellites. Difficult conditions indicate attenuation and reflection of the signals. Receivers achieve higher sensitivity of signal reception by larger number of correlators and longer integration time. The present doctoral dissertation deals with classical methods of observation processing in normal conditions used for observation processing in challenging environments. Some of the methods are more effective in difficult conditions than others. Processing of observation data in dynamic and quick changing conditions requires careful and consistent treatment. Otherwise a gross error in position determination can occur. Multipath has the biggest influence on final results and has a special effect on code observations. Therefore, Doppler observations are also included in the position determination. The custom developed procedure of positioning in challenging environments beside well known and established methods includes additional methods which assure higher accuracy and reliability of the determined position. Processing procedures have been tested in different conditions in static and kinematic cases. The acquired results have been compared to those processed inside the receiver. A so-called conditional DGPS has been developed, which determines the position differentially by using only data from strong signals.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem vsem, ki so me ob izdelavi disertacije spremljali po strokovni plati, predvsem mentorju izr. prof. dr. Bojanu Stoparju in ostalim članom komisije za oceno doktorske disertacije ter Oskarju Sterletu za osnovne algoritme. Hvaležen sem za vse informacije in ideje, ki sem jih pridobil skozi izdelavo naloge. Obenem se zahvaljujem doc. dr. Dušanu Petroviču, izr. prof. Bojanu Stoparju in vodstvu UL FGG, da so mi sploh omogočili zaključiti doktorski študij.

Brez moralne podpore in vzpodbude moje družinice tega ne bi zmozel opraviti. Neizmerno sem vama hvaležen, ker sta zdržali ob meni!

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Opis obravnavane vsebine.....	1
1.2	Predstavitev hipotez in metod dela.....	3
1.3	Namen in cilji raziskav.....	6
1.4	Struktura naloge.....	7
2	GNSS V OTEŽENIH POGOJIH.....	9
2.1	Sistemi GNSS.....	9
2.2	Tipi opazovanj GPS, vplivi na opazovanja in pogreški opazovanj.....	10
2.3	Načini določitve položaja z opazovanji GPS.....	14
2.4	Razredi instrumentov GPS in njihova uporaba.....	15
2.5	HS GNSS.....	16
2.5.1	Razmerje moči in šuma signala.....	17
2.5.2	Zaznavanje in sledenje signalov.....	18
2.5.3	Modeli HS GPS.....	20
2.5.4	Posredovanje obdelanih ali surovih podatkov s sprejemnika.....	22
2.5.5	Uporaba sprejemnikov HS GPS in vplivi na opazovanja v oteženih pogojih..	24
2.6	Pregled raziskav na področju navigacije v oteženih pogojih.....	25
2.7	Določitev položaja ter modeliranje vplivov in pogreškov.....	31
2.7.1	Vloga faznih in Dopplerjevih opazovanj pri določitvi položaja.....	31
2.7.2	Matematični model avtonomne določitve položaja.....	34
2.7.3	Uporaba DGPS za določitev položaja.....	38
2.7.4	Modeliranje ionosferske refrakcije.....	40
2.7.5	Modeliranje troposferske refrakcije.....	41
2.7.6	Uporaba natančnih efemerid.....	42
2.7.7	Utež opazovanja v odvisnosti od višinskega kota signala.....	42
2.7.8	Utež opazovanja v odvisnosti od razmerja moči in šuma signala.....	43
2.7.9	Odkrivanje in izločanje grobih pogreškov.....	44

3	RAZVOJ LASTNIH POSTOPKOV OBDELAVE OPAZOVANJ.....	45
3.1	Tipi opazovanj in metoda najmanjših kvadratov	45
3.2	Metode robustne statistike	46
3.3	Postopek določitve položaja z lastnim programskim paketom.....	49
3.3.1	Določitev začetnega položaja.....	49
3.3.2	Določitev položaja v nadaljnjih epohah.....	50
3.3.3	Določitev položaja s pogojnim DGPS	53
4	TESTIRANJE POSTOPKOV OBDELAVE PODATKOV IN OPREME HS GPS	55
4.1	Testiranja v različnih pogojih	55
4.2	Oprema HS GPS v preizkusih.....	58
4.3	Preizkus metod, modelov, uteži in nastavitev obdelave opazovanj.....	60
4.3.1	Brezpogojni DGPS v oteženih pogojih.....	61
4.3.2	Vpliv ionosfere na opazovanja GPS	64
4.3.3	Vpliv troposfere na opazovanja GPS.....	66
4.3.4	Metoda najmanjših kvadratov, robustne statistike in izločanje grobih pogreškov.....	69
4.3.5	Utež opazovanja glede na višinski kot satelita.....	74
4.3.6	Utež opazovanja glede na razmerje moči in šuma signala.....	77
4.3.7	Obdelava opazovanj z natančnimi efemeridami	79
4.4	Vpliv tipov opazovanj, modelov, uteži in specifičnih postopkov na rezultate	81
4.4.1	Kodna opazovanja.....	81
4.4.2	Dopplerjeva opazovanja.....	87
4.4.3	Kombinacija kodnih in Dopplerjevih opazovanj	94
4.5	Ocena vpliva večpotja na kodna opazovanja	111
4.6	Primerjava sprejemnikov in anten.....	114
5	ANALIZA DOBLJENIH REZULTATOV	117
5.1	Analiza uporabljenih postopkov	118
5.2	Vrednotenje rezultatov obdelave	127
5.3	Neuspešni postopki	129
5.4	Dodatne tehnologije kot pomoč pri določanju položaja v oteženih pogojih.....	131

6	SKLEPNE UGOTOVITVE IN MOŽNOSTI NADALJNJEGA RAZVOJA	135
7	POVZETEK	141
8	SUMMARY	145
VIRI		149
	Spletne strani ponudnikov opreme in podatkov	154

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2-1: Pregled HS GPS čipov na trgu.....	20
Preglednica 4-1: Primerjava rezultatov obdelave z natančnimi in oddanimi efemeridami	80
Preglednica 4-2: Statistične vrednosti značilnih rešitev znotraj objekta.....	111

KAZALO SLIK

Slika 2-1: Pogrešek večpotja	12
Slika 2-2: Modul GPS in preizkusni set	21
Slika 2-3: Antena tipa »patch« in antena tipa »geohelix«	21
Slika 4-1: Osnovne izmeritvene točke	56
Slika 4-2: Izmeritvene točke na strehi stavbe in znotraj objekta, izvedba izmere	57
Slika 4-3: Shema kinematičnih izmer na posnetku ortofoto	58
Slika 4-4: Antena "geohelix" na povezovalni plošči	59
Slika 4-5: DGPS v neoviranih pogojih	62
Slika 4-6: DGPS v oteženih pogojih	62
Slika 4-7: DGPS znotraj objekta	63
Slika 4-8: Celotni DGPS znotraj objekta	64
Slika 4-9: Vpliv ionosfere glede na čas v dnevu	65
Slika 4-10: Vpliv ionosfere glede na višinski kot	66
Slika 4-11: Niell-ov model troposferske projekcijske komponente	67
Slika 4-12: Model troposfere Saastamoinen-Niell	68
Slika 4-13: Utež opazovanj glede na višinski kot satelita	74
Slika 4-14: Uporaba uteži višinskega kota v neoviranih pogojih	75
Slika 4-15: Uporaba uteži višinskega kota v oteženih pogojih	75
Slika 4-16: Uporaba uteži višinskega kota znotraj objekta	76
Slika 4-17: Uporaba uteži opazovanja glede na SNR v neoviranih pogojih	77
Slika 4-18: Uporaba uteži opazovanja glede na SNR v oteženih pogojih	78
Slika 4-19: Uporaba uteži opazovanja glede na SNR v robustni obdelavi	79
Slika 4-20: Primerjava rezultatov obdelave z natančnimi in oddanimi efemeridami	80
Slika 4-21: Grafikon popravkov sprejemnikove ure	82
Slika 4-22: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure v neoviranih pogojih	83
Slika 4-23: Rezultati obdelave kodnih opazovanj z MNK in robustno metodo	84
Slika 4-24: Grafikon sprememb popravkov sprej. ure pri opazovanjih znotraj objekta	84
Slika 4-25: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure v mešanih pogojih	85
Slika 4-26: Rezultati MNK in robustne metode v mešanih pogojih	86
Slika 4-27: Kodna opazovanja v neoviranih in mešanih pogojih	87

Slika 4-28: Grafikon sprememb popravkov sprej. ure pri obdelavi D1 v neoviranih pogojih	88
Slika 4-29: Rezultati obdelave D1 z MNK in robustno metodo v neoviranih pogojih.....	89
Slika 4-30: Grafikon sprememb popravkov sprej. ure pri obdelavi D1 znotraj objekta.....	89
Slika 4-31: Rezultati obdelave D1 z MNK in robustno metodo znotraj objekta	90
Slika 4-32: Grafikon sprememb popravkov sprej. ure pri obdelavi D1 v mešanih pogojih	91
Slika 4-33: Rezultati MNK in robustne metode z obdelavo D1 v mešanih pogojih.....	91
Slika 4-34: Dopplerjeva opazovanja v neoviranih in mešanih pogojih	92
Slika 4-35: Različni tipi rešitev za Dopplerjeva opazovanja v mešanih pogojih.....	94
Slika 4-36: Hatch-filter za opazovanja v oteženih pogojih.....	95
Slika 4-37: Različni tipi rešitev v mešanih pogojih v okolju (e)	97
Slika 4-38: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure v ločeni obdelavi.....	99
Slika 4-39: Primerjava končne in interne rešitve v okolju (e)	100
Slika 4-40: Primerjava višin končne in interne rešitve v okolju (e).....	101
Slika 4-41: Pogojni DGPS v okolju (e).....	102
Slika 4-42: Primerjava višin pogojnega DGPS v okolju (e).....	102
Slika 4-43: Različni tipi rešitev v mešanih pogojih v okolju (d)	105
Slika 4-44: Pogojni DGPS v okolju (d)	106
Slika 4-45: Različni tipi rešitev v oteženih pogojih v okolju (f).....	107
Slika 4-46: Primerjava rešitev znotraj objekta v večjem merilu	108
Slika 4-47: Primerjava rešitev znotraj objekta v manjšem merilu	109
Slika 4-48: Spremembe sprej. ure v najslabši in v najboljši rešitvi znotraj objekta	110
Slika 4-49: Ocena pogreška večpotja z Dopplerjevimi opazovanji	112
Slika 4-50: Ocena pogreška večpotja z opazovanji VRS.....	113
Slika 4-51: Primerjava ocen večpotja z Dopplerjevimi opazovanji in VRS.....	114
Slika 4-52: Primerjava sprejemnikov HS GPS	115
Slika 4-53: Primerjava anten v oteženih pogojih.....	116
Slika 5-1: Primerjava odstopanj položaja in standardnega odklona	128

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

AGPS	angl. Assisted GPS
ASCII	angl. American Standard Code for Information Interchange
C/A	angl. Coarse Acquisition
C/N_0	angl. Carrier-to-noise power density ratio
CODE	angl. Center for Orbit Determination in Europe
DGPS	angl. Differential GPS
DOP	angl. Dilution of precision
EGNOS	angl. European Geostationary Navigation Overlay System
ESA	angl. European Space Agency
GIS	Geografsko informacijski sistemi
GLONASS	angl. Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema
GNSS	angl. Global Navigation Satellite System
GPS	angl. Global Positioning System
GPS SPS	angl. GPS Standard Positioning Service
HS GPS	angl. High Sensitivity GPS
IGS	angl. International GNSS Service
INS	angl. Inertial Navigation System
IONEX	angl. IONosphere EXchange
MEMS	angl. Micro Electro Mechanical Systems
MNK	Metoda najmanjših kvadratov
MSAS	angl. Multi-functional Satellite Augmentation System
NGS	angl. National Geodetic Survey
NMEA	angl. National Marine Electronics Association
RINEX	angl. Receiver INdependent EXchange
RMS	angl. Root Mean Square
RTCM	angl. Radio Technical Commission for Maritime Services
SBAS	angl. Satellite Based Augmentation System

SNR	angl. Signal-to-noise ratio
SPS	angl. Standard Positioning Service
TEC	angl. Total Electron Content
TTFF	angl. Time to first fix
UERE	angl. User Equivalent Range Error
UWB	angl. Ultra Wide Band
VRS	angl. Virtual Reference Station
WAAS	angl. Wide Area Augmentation System

SLOVAR MANJ ZNANIH IZRAZOV IN TUJK

Namen slovarja je pojasnitev pomena strokovnih izrazov, ki smo jih uporabili v nalogi. Opis pojmov je avtorski, saj je velika večina izrazov zelo specifičnih in jih uporabljamo samo na obravnavanem znanstvenem področju. V splošni literaturi zato ne najdemo razlag izrazov v slovenskem jeziku. Za lažje razumevanje navajamo tudi izvirne izraze v angleškem jeziku. Splošne definicije so kratek združen povzetek opisov pojmov iz naslednjih virov: Encyclopedia Britannica (www.britannica.com), Merriam-Webster (www.merriam-webster.com) in Wikipedia (en.wikipedia.org, sl.wikipedia.org). Določenim izrazom smo dodali opis, ki se nanaša na GNSS in obravnavano tematiko v nalogi.

efemeride	Splošno: Tabela s podatki o legah nebesnih teles.
angl. ephemerides	GNSS: Skupek podatkov o tirnicah in položajih satelitov in urinih stanjih satelitskih ur.
epoha	Splošno: Referenčni časovni trenutek.
angl. epoch	GNSS: Časovni trenutek zajema podatkov opazovanj.
linija vidnosti	Splošno: Ravna linija med oddajnikom in sprejemnikom.
angl. line-of-sight	GNSS: Na optični liniji med sprejemnikom in satelitom ni fizičnih ovir, signali potujejo neovirano. V primeru radijskih valovanj je potrebno upoštevati še t.i. prvo Fresnelovo cono.
natančnost	Splošno: Stopnja ponovljivosti rezultatov meritev ob nespremenjenih pogojih.
angl. precision	GNSS: Stopnja razpršenosti rezultatov okoli srednje vrednosti.
ponastavitev ure	GNSS: Postopek sinhronizacije ure z referenčnim časom GPS, ko je odmik urinega stanja večji od določene vrednosti, običajno je to 1 ms.
angl. clock reset	

ppm	Splošno in GNSS: Kratica angleškega izraza »parts-per-million«, torej milijon-ti del, pri dolžinah tudi mm/km, s potenčnim zapisom 10^{-6} .
preizkusni set angl. evaluation kit	Splošno in GNSS: Merski komplet, ki vsebuje strojno in programsko opremo za takojšnje delo.
sledenje signala angl. signal tracking	GNSS: Sprejemanje signalov po pridobitvi podatkov o signalu (glej tudi zaznavanje signala).
sprememba faze med prekinitvijo angl. cycle-slip	GNSS: Izguba podatka o številu celih valov faznega valovanja ob prekinitvi sprejema signala.
točnost angl. accuracy	Splošno in GNSS: Stopnja ujemanja rezultatov meritev z dejansko vrednostjo.
urino stanje angl. clock offset	Splošno: Razlika med merjenim in točnim časom. GNSS: Razlika med notranjim časom sprejemnika oz. satelita in referenčnim časom sistema GNSS.
večpotje angl. multipath	Splošno: Pojav sprejema signala z dvema ali več potmi. GNSS: Pojav sprejema signala z več poti zaradi odboja signala od odbojnih površin.
zaznavanje signala angl. signal acquisition	GNSS: Faza začetnega sprejemanja in prepoznavanja signalov brez predhodnih podatkov o signalu.

1 UVOD

Uvodni del naloge vsebuje opis obravnavane vsebine ter predstavitev hipotez, metodologije raziskav in ciljev doktorske disertacije. Na koncu poglavja so kratki opisi vsebine naslednjih poglavij.

1.1 Opis obravnavane vsebine

Pojav visoko občutljivih sprejemnikov GPS (angl. Global Positioning System) predstavlja pomemben korak v razširitvi področij uporabe tehnologij GNSS (angl. Global Navigation Satellite System) za potrebe določitve položaja tudi v oteženih pogojih za sprejem signalov s satelitov. Kakovost določitve položaja je v takih pogojih je običajno nizka. Proizvajalci sicer stremijo k zagotovitvi čim višje točnosti položaja, ki pa je zaradi teoretičnih in praktičnih razlogov težko dosegljiva. Z znanstveno raziskovalnega stališča predstavlja ustrezna obravnava in realno vrednotenje opazovanj in položajev, pridobljenih z visoko občutljivimi senzorji instrumentov GPS, velik izziv. Pričujoča doktorska disertacija zajema aktualno tematiko določitve kakovostnega položaja na osnovi podatkov opazovanj GNSS v oteženih pogojih.

Sateliti GNSS oddajajo različne informacije v obliki radijskih valov. Za določitev položaja so pomembni naslednji podatki, ki jih sprejemniki pridobijo z obdelavo sprejetih signalov: kodne psevdo razdalje, vrednosti faze nosilnih valovanj in vrednost t.i. Dopplerjeve frekvence. Nujni so tudi podatki o položajih satelitov in urinih stanj satelitovih ur, ki so del navigacijskega sporočila.

Vsi sprejemniki imajo vgrajen algoritem, ki na osnovi podatkov opazovanj samodejno določi trenutni položaj. Le redki instrumenti iz razreda visoko občutljivih sprejemnikov pa omogočajo tudi posredovanje podatkov opazovanj, t.j. kodnih, faznih in Dopplerjevih opazovanj. Zgolj tovrstni podatki pa omogočajo razvoj lastnih postopkov za določitev

položaja. Raziskave v okviru naloge torej temeljijo na obdelavi razpoložljivih surovih opazovanj.

Oteženi pogoji za sprejem signalov s satelitov so okolja, kjer v splošnem velja, da se zmanjša število sprejetih signalov, vsaj del signalov je oslavljen zaradi potovanja skozi fizične ovire, signali pa se lahko pred prihodom na anteno sprejemnika odbijejo od odbojnih površin v bližini sprejemnika. Vse navedeno predstavlja otežene pogoje za določitev položaja, predvsem pa občutno zmanjšuje točnost položaja. Za otežene pogoje v splošnem smatramo t.i. urbane kanjone, gosto vegetacijo in notranjost objektov.

Osnovni način določitve položaja je avtonomni, kjer položaj sprejemnika določamo na osnovi opazovanj samega sprejemnika. Zaradi številnih vplivov in prisotnih pogreškov je točnost tako določenega položaja v dobrih pogojih pribl. 10 m, kot navaja Lachapelle (2007). Točnost določitve položaja lahko izboljšamo s t.i. diferencialnimi metodami, kar pomeni vključitev podatkov referenčnega sprejemnika v postopek določitve položaja obravnavanega premičnega sprejemnika. Če te metode temeljijo na kodnih opazovanjih, je dosežena točnost položaja v okviru enega metra, s faznimi opazovanji pa lahko dosežemo točnost razreda nekaj cm.

Vplivi na točnost določitve položaja na osnovi opazovanj GNSS so v splošnem naslednji: položaj in urino stanje posameznega satelita, ionosferska in troposferska refrakcija, večpotje signala, urino stanje sprejemnikove ure in šum sprejemnika. Podatke o položajih in urinih stanjih satelitov lahko pridobimo iz oddanega navigacijskega sporočila ali pa uporabimo t.i. natančne efemeride. Vpliv ionosfere in troposfere skušamo zmanjšati z ustreznimi modeli ionosfere in troposfere. Popravek urinega stanja sprejemnikove ure vključimo kot neznanko v model obdelave, šum sprejemnika pa je slučajni pogrešek in ga zelo težko ocenimo. Zelo težko določimo tudi pogrešek večpotja, ki je še posebej značilen za otežene pogoje in ima zelo velik vpliv na kodna opazovanja.

1.2 Predstavitev hipotez in metod dela

Določitev položaja na osnovi opazovanj GNSS v splošnem temelji na obdelavi kodnih, faznih in Dopplerjevih opazovanj. Kakovostna obdelava skuša dodatno zmanjšati ali povsem izničiti atmosferske vplive, predvsem pa zaznati grobo pogrešena opazovanja in zmanjšati vpliv večpotja.

Zaradi omejenih zmožnosti razpoložljive merske opreme GNSS lahko za določitev položaja uporabimo zgolj kodna in Dopplerjeva opazovanja. Osnovna določitev položaja temelji na kodnih opazovanjih, ki pa so najbolj izpostavljena vsem možnim vplivom, še posebej pa pogrešku večpotja. V oteženih pogojih lahko pričakujemo zelo velika odstopanja tako določenih položajev. Kakovost določitve položaja lahko sicer skušamo popraviti z diferencialnimi tehnikami, vendar pa te v osnovi predpostavljajo podobne pogoje za oba sprejemnika, kar pa seveda v primeru opazovanj v oteženih pogojih ne moremo zagotoviti. Diferencialne tehnike lahko uporabimo tudi pod določenimi pogoji, npr. da za določitev položaja v oteženih pogojih uporabimo samo podatke močnih signalov. Če so pogoji izpolnjeni, lahko pričakujemo višjo kakovost položajev glede na avtonomni način določitve položaja.

Možna rešitev je vključitev Dopplerjevih opazovanj v model obdelave, saj so le-ta v primerjavi s kodnimi opazovanji veliko manj obremenjena s pogreški in vplivi na opazovanja. Določitev položaja samo na osnovi Dopplerjevih opazovanj ni možna, kajti na osnovi Dopplerjeve frekvence, ki je posledica Dopplerjevega efekta, lahko izračunamo zgolj spremembo razdalje med sprejemnikom in satelitom in zato potrebujemo znano referenčno razdaljo do satelitov. Dopplerjeva opazovanja lahko uporabimo za glajenje kodnih opazovanj, v samostojni določitvi položaja, pri čemer mora biti vsaj začetni položaj določen iz kodnih opazovanj, ali v kombinaciji s kodnimi opazovanji. Več lahko pričakujemo od obeh slednjih načinov.

Določitev položaja s kodnimi opazovanji je tudi zelo občutljiva na spremembo sestave sprejetih signalov s satelitov med zaporednimi epohami, kar lahko vodi v netočno določitev

popravka sprejemnikove ure, posledično pa pride do pogreška v določitvi predvsem višinske komponente položaja, pogrešek pa lahko vpliva tudi na horizontalni komponenti položaja. V običajnih postopkih obdelave določamo popravek sprejemnikove ure in položaj hkrati, lahko pa ločeno obravnavamo urino stanje in položaj. V tem primeru lahko v prvi fazi popravek ure določamo na osnovi samo kodnih opazovanj, samo Dopplerjevih opazovanj ali obeh tipov opazovanj. Predvidevamo lahko, da prva možnost ne bo dajala optimalnih rezultatov, zato več pričakujemo od slednjih postopkov.

Ionosfera in troposfera vplivata na vsa opazovanja, tudi v oteženih pogojih. Ker imamo na razpolago samo enofrekvenčna opazovanja, ne moremo vpliva ionosfere oceniti s kombinacijo opazovanj, ampak jo ocenimo z modeli, med katerimi je najbolj razširjen Klobucharjev model. Čeprav obstoječi modeli ionosfere in troposfere temeljijo na predpostavkah in niso popolni, jih je smiselno uporabiti v postopku določitve položaja. Pričakujemo lahko višjo točnost položaja, kar pomeni, da bodo izračunani položaji bližje dejanskim položajem.

V primeru nadštevilnih opazovanj je najpogostejši postopek za pridobitev enolične rešitve izravnava po metodi najmanjših kvadratov. Metoda omogoča pridobitev rešitve ne glede na porazdelitev verjetnosti opazovanj, vendar postopki vrednotenja dobljene rešitve temeljijo na predpostavki normalne porazdelitve opazovanj. Opazovanja zato obravnavamo kot normalno porazdeljena, kar pomeni, da so obremenjena samo s slučajnimi pogreški, brez prisotnosti sistematičnih in grobih pogreškov. Slednje v oteženih pogojih težko zagotovimo. V takšnih primerih je bolj primerna uporaba postopkov t.i. robustne statistike, ki dodelijo utež opazovanjem glede na velikost popravka posameznega opazovanja. Popravek je razlika med merjeno in izravnano vrednostjo opazovanja. Glede na lastnosti ene in druge metode ter značilnosti oteženih pogojev lahko boljše rezultate pričakujemo od obdelave z metodami robustne statistike.

V obdelavi opazovanj GNSS lahko uporabimo dodatne uteži, npr. uteži, odvisne od višinskega kota satelita, in uteži v odvisnosti od razmerja moči in šuma signala. Utež, določena v odvisnosti od višinskega kota satelita, zmanjša vpliv opazovanj s satelitov z nizkim višinskim kotom in je običajna za opazovanja v normalnih pogojih. Signali, ki

prehajajo skozi ovire, so oslabljeni in imajo manjše razmerje moči in šuma. Če želimo zmanjšati vpliv oslabljenih signalov, uporabimo postopek, ki slabotnim signalom dodeli manjšo utež kot močnejšim. Vpliv uporabe obeh dodatnih uteži bomo preučili v nalogi, vendar pa bistvenega napredka v kakovosti doseženega položaja ni za pričakovati.

Pogrešek večpotja vpliva predvsem na kodna opazovanja. Vpliv pogreška večpotja lahko zmanjšamo s kombinacijo obeh tipov opazovanj in z metodami robustne statistike. Glede na to, da med nemodelirane vplive na kodna in Dopplerjeva opazovanja spadata samo pogrešek večpotja in šum sprejemnika, velikost slednjega pa je veliko manjši kot vpliv večpotja, lahko pogrešek večpotja kodnih opazovanj ocenimo s pomočjo Dopplerjevih opazovanj. Pričakujemo lahko pogreške velikosti več 10 m.

Testne izmere v okviru raziskav bomo izvajali v statičnem in kinematičnem načinu v različnih pogojih, in sicer v neoviranih, delno oviranih pogojih, znotraj objekta in v mešanih pogojih. Statične izmere na točkah z danim položajem nudijo več možnosti primerjav in ocene natančnosti.

V navedenih pogojih bomo preizkusili in analizirali posamične zgoraj naštet metode, modele in uteži. Obravnavali bomo vse možne kombinacije opazovanj: kodna opazovanja, Dopplerjeva opazovanja in kombinacijo obeh tipov opazovanj. Preizkusili bomo različne kombinacije metod in uteži pri različnih kombinacijah tipov opazovanj.

Poleg analize navedenih metod naloga vključuje razvoj lastne metode obdelave, ki naj bi poleg uveljavljenih rešitev še dodatno pripomogla h kakovostni določitvi položaja.

Za primerjavo z najbolj značilnimi običajnimi rešitvami in lastno razvito metodo bomo v analizo vključili tudi interne rešitve sprejemnika.

1.3 Namen in cilji raziskav

Glavni namen raziskav v okviru disertacije je razvoj postopkov obdelave opazovanj GNSS v oteženih pogojih, ki bi modelirali sistematične pogreške, minimizirali vpliv pogreška večpotja ter odstranili ali minimizirali vpliv grobih pogreškov. Dobro določen popravek sprejemnikove ure je osnovni pogoj za kakovostno določitev položaja. Določitev samega položaja sprejemnika temelji na vseh razpoložljivih podatkih, ki pa morajo biti ustrezno ovrednoteni in obravnavani.

Končna rešitev vključuje optimalno kombinacijo omenjenih modelov, metod in uteži opazovanj z ustreznimi nastavitvami, poleg tega pa še dodatne postopke, ki še zvišajo doseženo točnost. Želja je, da bi bila lastno razvita metoda poleg tega tudi varna metoda. Varna metoda mora zagotoviti kakovostno določitev položaja v vseh možnih pogojih, kajti obstajajo postopki, ki dajejo boljše rezultate v določenih specifičnih pogojih, v drugih pa povzročijo velika odstopanja od pravih vrednosti.

Poudarek pri raziskavah je predvsem na navigaciji oseb v urbanih okoljih, saj je tam za uporabnika bolj pomembna točnost položaja, pa tudi pogoji so precej bolj raznoliki in spremenljivi kot v naravnih okoljih. Majhen premik lahko pomeni povsem drugačne pogoje, medtem ko so pogoji v naravnem okolju bolj homogeni. Obenem ni razloga za dvom, da rešitev, ki dobro deluje v urbanem okolju, ne bi dobro delovala tudi v neurbanem okolju.

Osnovni cilj razvoja postopkov obdelave je doseči čim višjo kakovost in zanesljivost položaja v oteženih pogojih za sprejem signalov s satelitov. Drugače rečeno, v oteženih pogojih pogosto »divja« opazovanja skušamo spraviti v okvir, ki še ima zadovoljivo točnost položaja. Prevelike točnosti v takih pogojih ne smemo pričakovati, v vsakem primeru je slabša kot v neoviranih pogojih. Cilj je torej jasen: doseženo točnost čim bolj približati tisti v neoviranih pogojih.

1.4 Struktura naloge

Poglavje 2 v začetnem delu predstavlja osnovni pregled sistemov GNSS, s poudarkom na predstavitvi različnih tipov opazovanj in načinov določitve položaja. Drugi del poglavja je namenjen opisu posebne vrste sprejemnikov GPS, ki so zmožni sprejemati tudi zelo šibke signale. Naslednji del poglavja 2 vsebuje pregled nekaterih dostopnih raziskav iz obravnavane tematike. Sklepni del poglavja opisuje princip avtonomne določitve položaja, modeliranje vplivov ionosfere in troposfere ter možnosti uporabe natančnih efemerid, kar so običajni postopki pri obdelavah opazovanj GNSS. Predstavljamo še dve dodatni možnosti, ki opazovanjem dodelita utež glede na višinski kot satelita ter razmerje moči in šuma signala.

Poglavje 3 detajlno opisuje postopke v okviru lastno razvite metode za obdelavo opazovanj GPS v oteženih pogojih.

Poglavje 4 vsebuje grafične, numerične in opisne zapise preizkusov opreme ter različnih metod, modelov in nastavitev v obdelavi različnih kombinacij tipov opazovanj. V to poglavje smo vključili tudi možnost pridobitve ocene pogreška večpotja na kodna opazovanja ter primerjavo sprejemnikov in različnih tipov anten.

Poglavje 5 vsebuje analizo dobljenih rezultatov, opis neuspešnih postopkov in možnosti združevanja z drugimi tehnologijami.

Sklepne ugotovitve so zapisane v poglavju 6, kjer so navedene tudi možnosti nadaljnjega razvoja.

Poglavje 7 predstavlja povzetek raziskav in dobljenih rezultatov.

Poglavje 8 vsebuje povzetek v angleškem jeziku.

Na koncu dokumenta je seznam uporabljene literature in drugih virov.

----- ta stran je namenoma prazna -----

2 GNSS V OTEŽENIH POGOJIH

V nadaljevanju podajamo kratek pregled osnovnih značilnosti sistemov GNSS, tipov opazovanj in vplivov na opazovanja, metod določitve položaja in kakovostnih razredov instrumentov.

2.1 Sistemi GNSS

GNSS je tehnologija določanja položaja na osnovi sprejema radijskih signalov s satelitov, ki krožijo okoli Zemlje. Najbolj uveljavljen sistem GNSS je GPS, ki ga je v 80-ih letih začelo vzpostavljati obrambno ministrstvo ZDA. Podoben sistem z imenom GLONASS (rus. Globalnaja Navigacionnaja Sputnikovaja Sistema) so v istem času vzpostavili v takratni Sovjetski zvezi. V 90-ih letih sta razvoj in vzdrževanje sistema GLONASS zastala in sistem več let ni bil uporaben. Rusija v zadnjih letih ponovno vzpostavlja sistem satelitov in v nekaj letih naj bi bil sistem že polno delujoč. Sistem Galileo je civilni projekt GNSS, ki ga izvaja Evropska unija. Sistem je še v testni fazi. Do polne realizacije sistema bo minilo še kar nekaj let.

Ker je bil GPS dejansko nekaj časa edini uporaben in globalno delujoči sistem GNSS, smo do nedavnega za satelitsko določanje položaja uporabljali kar izraz GPS. Z obnovo sistema GLONASS in z vzpostavljanjem novih sistemov, kot so evropski Galileo in kitajski Compass/Beidou, se ponovno uveljavlja splošen izraz globalni navigacijski satelitski sistemi - GNSS.

Vsak sistem GNSS sestavljajo trije segmenti: vesoljski, nadzorni in uporabniški. Vesoljski segment predstavljajo sateliti, ki oddajajo signale proti Zemlji. Nadzorni segment skrbi za točno delovanje satelitovih ur in odpravlja napake v položajih satelitov. Uporabniški segment tvorijo uporabniki sistema na kopnem, vodi ali v zraku. Uporabnik potrebuje ustrezen sprejemnik za sprejem signalov s satelitov. Vsak sistem GNSS ima svoje lastne satelite in

razporeditev satelitov, svoje specifične frekvence valovanj in svoje načine kodiranja signalov. Temu primerno morajo sprejemniki GNSS vsebovati ustrezno elektroniko, da lahko sprejemajo signale enega ali več sistemov. Sprejemniki GPS lahko namreč sprejemajo samo signale s satelitov GPS, sprejemniki z oznako GNSS pa sprejemajo signale tako s satelitov GPS kot s satelitov GLONASS, nekateri od njih pa podpirajo tudi signale sistema Galileo. Osnovna uporaba sistemov GNSS, npr. GPS SPS (angl. GPS Standard Positioning Service), je brezplačna in je na razpolago kjerkoli na Zemlji, kadarkoli in v vseh vremenskih pogojih.

Ker uporabniki satelitske navigacije še vedno najbolj množično koristijo sistem GPS, poleg tega vsi visoko občutljivi sprejemniki GNSS, ki so predmet obravnave pričujoče disertacije, temeljijo zgolj na sprejemu signalov s satelitov GPS, se bo naloga v nadaljevanju osredotočila na sistem GPS.

Sateliti GPS oddajajo signale v obliki moduliranih elektromagnetnih valovanj na dveh frekvencah, in sicer 1575,42 MHz na L_1 in 1227,60 MHz na L_2 . Navedene frekvence ustrezajo valovnim dolžinam $\lambda_1 \approx 19$ cm in $\lambda_2 \approx 24$ cm. Nosilno valovanje L_1 je modulirano s t.i. C/A (angl. Coarse Acquisition) kodo, s P (angl. Precise) kodo oz. njeno kodirano različico Y in z navigacijskim sporočilom. Valovanje L_2 nosi P oz. Y kodo in navigacijsko sporočilo.

2.2 Tipi opazovanj GPS, vplivi na opazovanja in pogrški opazovanj

Sprejemniki GPS so sposobni sprejemati in obdelati sprejete signale s satelitov GPS. Rezultat obdelave signalov so trije osnovni tipi opazovanj:

- kodne psevdo razdalje,
- fazna opazovanja in
- Dopplerjeva opazovanja.

Psevdo razdalja predstavlja razdaljo med sprejemnikom in satelitom in vključuje pogrške položaja satelita ter urinih stanj satelitove in sprejemnikove ure, vplive atmosfere in elektromagnetni šum. Fazna opazovanja predstavljajo razliko med fazo sprejetega signala

valovanja in fazo signala valovanja, ki ga ustvari sprejemnik. Dopplerjev efekt je posledica relativne spremembe razdalje med sprejemnikom in satelitom in se kaže v spremembi sprejete frekvence valovanja. Več o signalih in tipih opazovanj lahko najdemo v različni literaturi, npr. Leick (1995) in Xu (2007).

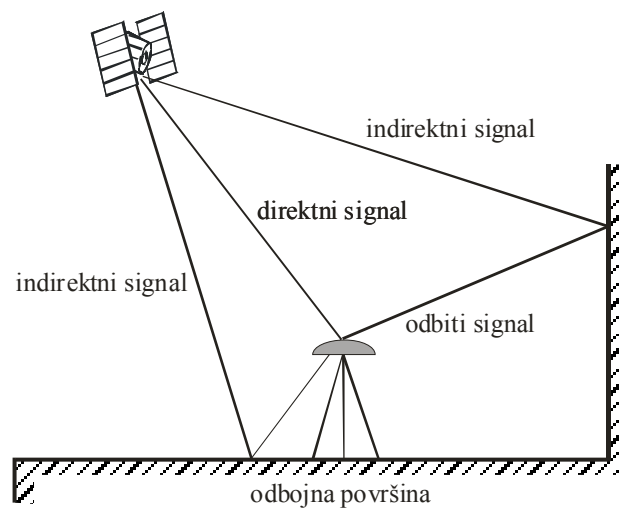
Vplive na opazovanja lahko razdelimo glede na to, ali imajo izvor v satelitu, sprejemniku ali v mediju, skozi katerega potuje signal. V prvo skupino spadata pogrešek tirnice satelita in pogrešek urinega stanja satelitove ure. V sprejemniku imajo izvor naslednji pogreški: pogrešek urinega stanja sprejemnikove ure, večpotje, šum sprejemnika in odklon faznega centra antene. Vpliv atmosfere na hitrost potovanja signala skozi njo imenujemo atmosferska refrakcija. Delimo jo na ionosfersko in troposfersko refrakcijo.

Trenutni položaj satelita predvidimo na osnovi predhodnih podatkov o tirnicah in položajih satelita. Izračun predvidenih položajev satelitov izvajajo v nadzornih postajah. Podatki o predvidenem položaju satelita so del navigacijskega sporočila, ki ga sateliti oddajajo hkrati z ostalimi podatki v obliki signala. Tovrstne podatke o tirnicah in položajih satelitov na tirnicah imenujemo oddane efemeride (angl. broadcast ephemerides). Pogrešek položaja satelita na tirnici običajno seže do 5 m, kot navaja El-Rabbany (2002). Vpliv pogreška na določitev položaja je odvisen od velikosti komponent vektorja odmika dejanskega položaja od predvidenega položaja satelita in od višinskega kota satelita nad horizontom sprejemnika. Specifične naloge, ki zahtevajo visoko točnost določitve položaja, t.j. okoli 1 cm, zahtevajo uporabo bolj natančnih efemerid od tistih, ki jih vsebuje navigacijsko sporočilo. Različne institucije, npr. IGS (angl. International GNSS Service) in NGS (angl. National Geodetic Survey), ponujajo t.i. natančne efemeride, ki jih pridobijo z naknadnim izračunom po opravljenih meritvah. Efemeride so na razpolago na spletu in so praviloma brezplačne, obstaja pa več kategorij natančnosti tirnic. Najbolj natančne tirnice, v primeru IGS so to končne (angl. final), so uporabnikom na voljo z več kot 10-dnevnim zamikom. Najhitreje so na voljo t.i. »ultra-rapid« efemeride, ki jih je možno pridobiti tudi v resničnem času, za njih pa velja, da je del podatkov obdelan, del podatkov pa predviden.

Sateliti GPS vsebujejo štiri atomske ure, od katerih ena služi za časovne in frekvenčne naloge, ostale pa so rezervne. Čeprav so ure v satelitih zelo točne, niso popolne. Stabilnost ur v toku

enega dne je okoli 10 ns, kar v dolžini elektromagnetnega valovanja prinese okoli 3 m, največ pa 5 m, sodeč po podatkih v El-Rabbany (2002). Delovanje satelitovih ur nadzirajo kontrolne postaje, ki tudi izračunajo velikost popravka urinega stanja satelitovih ur. Le-ta je v obliki treh koeficientov kvadratnega polinoma vključen v podatkih efemerid.

Sprejemniki GPS v nasprotju s sateliti vsebujejo cenene kvarčne ure, ki so precej manj stabilne od satelitovih ur. Ker je lahko pogrešek sprejemnikove ure zelo velik, le-tega običajno vključimo v postopek obdelave opazovanj GPS kot dodatno neznancko.



Slika 2-1: Pogrešek večpotja

Fig 2-1: Multipath effect

Večpotje (angl. multipath) vpliva na kodna in fazna opazovanja. Pogrešek se pojavi, kadar signal ne prispe na anteno samo neposredno, ampak se del signala dodatno odbije od odbojnih površin v bližini antene, kot je prikazano na sliki 2-1. Izmerjena razdalja med sprejemnikom in satelitom je v primeru odbitega signala posledično daljša od dejanske. Pogrešek ima veliko večji vpliv na kodna opazovanja, saj lahko doseže več 10 metrov. V primeru faznih opazovanj je največja vrednost pogreška $\frac{1}{4}$ valovne dolžine, kar za nosilno valovanje L_1 pomeni pribl. 4,8 cm, kot navaja El-Rabbany (2002). Pogrešek večpotja je problematičen predvsem pri kinematičnih meritvah, saj ima značilnosti sistematičnega pogreška in ga je zelo težko modelirati.

Šum sprejemnika je posledica delovanja elektronskih komponent v ohišju sprejemnika. Kakovostni sprejemniki GPS naj bi vsebovali minimalno stopnjo šuma. Sodeč po Shaw in sod. (2000), je tipična vrednost pogreška določitve razdalje zaradi šuma sprejemnika 0,6 m.

Fazni center antene je točka, kjer elektronika antene sprejme signal. Fazni center ne sovпада s fizičnim centrom antene, ki ga določi proizvajalec antene in je stalen. Odmik faznega od fizičnega centra je odvisen od višinskega kota in azimuta sprejetega signala, velikostni razred pogreška pa predvsem od tipa antene. Velikost odmika je običajno takšna, da v večini praktičnih aplikacij GPS ta pogrešek zanemarimo. Izjema so najbolj točne meritve in izračuni, kjer moramo upoštevati tudi ta pogrešek.

Ionosfera je disperzivni medij, ki se razteza med okvirno 50 in 1000 km višine nad Zemljo. Ionosfera pospešuje širjenje faze nosilnega valovanja, medtem ko zavira širjenje kode in navigacijskega sporočila za enako vrednost. V splošnem je vpliv ionosferske refrakcije na izmerjeno razdaljo med sprejemnikom in satelitom med 5 in 15 m, lahko pa celo preseže 150 m ob skrajnih sončevih aktivnostih, kot navaja El-Rabbany (2002). Vpliv ionosfere je odvisen od frekvence valovanja, kar lahko izkoristimo za modeliranje refrakcije v primeru večfrekvenčnih opazovanj.

Troposfera je sloj atmosfere do okvirno 50 km nad Zemljo. Troposfera zavira širjenje faze in kode nosilnega valovanja. Troposferska refrakcija je neodvisna od frekvence valovanja. Delimo jo na suho in mokro komponento. Suho komponento lahko dobro ocenimo z matematičnimi modeli. Nasprotno temu mokro komponento težko ocenimo zaradi odvisnosti od gostote vodne pare na poti signala skozi troposfero, kar pa je zelo težko določiti. Signali s satelitov, ki imajo nizek višinski kot nad horizontom sprejemnika, prepotujejo daljšo razdaljo skozi troposfero kot signali s satelitov blizu zenita. Tipične vrednosti za troposfersko refrakcijo, kot jih navaja Leick (1995), so okvirno 2-5 m v zenitu in 20-28 m za 5-stopinjski višinski kot.

Natančnost določitve položaja je poleg naštetih dejavnikov odvisna tudi od geometrijske razporeditve satelitov. Večja razpršenost satelitov nad obzorjem sprejemnika pomeni boljšo natančnost, velja pa tudi obratno. Vpliv razporeditve satelitov na natančnost določitve

položaja določajo faktorji DOP (angl. Dilution of precision). Faktor DOP je obratno sorazmeren s prostornino telesa, ki ga tvorijo sprejemnik in štirje najboljše razporejeni sateliti v posameznem trenutku. Manjša vrednost DOP pomeni boljšo geometrijsko razporeditev satelitov in posledično višjo natančnost določitve položaja.

2.3 Načini določitve položaja z opazovanji GPS

Položaj na osnovi opazovanj GPS lahko določimo na dva načina: avtonomni in diferencialni. V avtonomnem načinu je prisoten en sam sprejemnik GPS, ki običajno določa svoj položaj na osnovi kodnih psevdo razdalj. Glede na podatke, ki jih navajajo Shaw in sod. (2000), lahko civilni uporabniki po ukinitvi mehanizma SA (angl. Selective Availability) leta 2000 praviloma dosegajo točnosti horizontalnih položajev znotraj 10 m. Isti avtorji navajajo, da znaša dejanska pričakovana točnost določitve položaja v 95 % primerov 22 m v horizontalnih komponentah in 33 m v višinski komponenti.

Višji nivo točnosti dosežemo z diferencialnim načinom določanja položaja. V postopek določitve položaja vključimo podatke drugega, referenčnega sprejemnika, ki v času izmere stoji na točki z znanim položajem. Če oba sprejemnika sprejemata signale z vsaj štirih skupnih satelitov, lahko pridobimo položaje z točnostjo nivoja 1 cm oz. nekaj metrov, kot navaja El-Rabbany (2002). Dosežen nivo točnosti je odvisen od tipov opazovanj. Kodna diferencialna opazovanja, pogosto označena z DGPS (angl. differential GPS), omogočajo točnost nekaj metrov, medtem ko fazna opazovanja dosegajo najvišji razred točnosti. Diferencialni GPS lahko izvajamo v resničnem času ali z naknadno obdelavo.

Izboljšavo točnosti določitve položaja lahko dosežemo tudi z uporabo regionalnih popravkov, ki nosijo oznako SBAS (angl. Satellite Based Augmentation System). Delovanje sistema temelji na izračunu popravkov opazovanj za določeno območje in posredovanju teh popravkov preko geostacionarnih satelitov. Trenutno obstajajo trije sistemi: WAAS (angl. Wide Area Augmentation System), ki pokriva severno Ameriko, EGNOS (angl. European Geostationary Navigation Overlay System), ki pokriva Evropo in severno Afriko, in japonski MSAS (angl. Multi-functional Satellite Augmentation System), ki pokriva del Azije in

Pacifiške regije. Sistemi so brezplačni, so pa večinoma še vedno v fazi razvoja. Evropski sistem EGNOS je uradno, glede na zapis na spletni strani ESA (angl. European Space Agency), na razpolago za polno uporabo od 1. oktobra 2009 naprej. Sprejemnik mora za sprejem signalov z geostacionarnih satelitov SBAS vsebovati ustrezno elektroniko, poleg tega pa mora interni algoritem za določitev položaja znati upoštevati tovrstne popravke. Točnost položaja, ki je določen s pomočjo SBAS, naj bi bila 1-2 m, kot navaja zgoraj navedena spletna stran, podobno točnost pa sta ugotovila Chen in Li (2004).

Uporabnik sistema GPS določa položaj s sprejemnikom in anteno GPS. Antena GPS je del opreme, ki sprejema signale s satelitov in analogni signal pretvori v digitalni bitni zapis. Podatke opazovanj v taki obliki posreduje sprejemniku, ki te podatke obdela. Običajno sta antena in sprejemnik v skupnem ohišju, predvsem pri kompaktnih enotah. Za najbolj točne meritve in za permanentne postaje GPS praviloma uporabljamo ločene antene in sprejemnike.

2.4 Razredi instrumentov GPS in njihova uporaba

Nivo dosežene točnosti je poleg tipov opazovanj, metod določitve položaja in atmosferskih pogojev odvisen tudi od opreme. Instrumente GPS lahko glede na doseženo točnost položajev in uporabo razdelimo v 3 skupine:

- navigacijski,
- GIS/GPS in
- geodetski.

Navigacijski instrumenti so najbolj osnovni, najmanjši, najlažji in najcenejši. Položaj določajo avtonomno na osnovi kodnih psevdo razdalj. Dosežena točnost položaja je okvirno 10 m, kar je običajno dovolj dobro za približno navigacijo oseb, vozil, plovil in letal.

Srednji razred predstavljajo t.i. GIS/GPS instrumenti, ki so namenjeni predvsem zajemu in ažuriranju podatkovnih baz v GIS (Geografski informacijski sistemi) ali kartiranju v resničnem času. Značilnost teh inštrumentov je predvsem programska oprema, ki je

nameščena za tovrstne naloge. Instrumenti lahko položaj določijo na osnovi kodnih opazovanj, pri čemer naj bi bila natančnost zaradi boljše strojne opreme in manj šuma višja kot pri navigacijskih instrumentih, ali na osnovi kombinacije kodnih opazovanj in faze na frekvenci L_1 . Pričakovana točnost položaja teh instrumentov je nekaj 10 cm.

V najvišji razred spadajo t.i. geodetski sprejemniki. Le-ti določajo položaj na osnovi opazovanj kode in faze na frekvencah L_1 in L_2 , poleg tega pa vsebujejo napredne algoritme za določitev celih začetnih valov in filtre za modeliranje vplivov na opazovanja. Kompaktne izvedbe instrumentov imajo sprejemnik in anteno v istem ohišju, obenem pa ima večina teh instrumentov tudi možnost priklopa zunanje antene. Instrumenti v dobrih pogojih in s primerno metodo izmere in obdelave omogočajo točnost določitve položaja nekaj cm v resničnem času, z dolgotrajnimi opazovanji in z naknadno obdelavo pa celo manj kot 1 cm. Pričakovana točnost geodetskega sprejemnika v statični izmeri je, kot navaja El-Rabbany (2002), 5 mm + 1 ppm (angl. parts per million).

Območje uporabe sistemov GNSS v praksi je zelo široko. Primarna naloga je določitev položaja. Ta je lahko približna za potrebe navigacije, sledenje in nadzor oseb in vozil, cestninjenje in zajem objektov za GIS, lahko pa zelo točna za potrebe določitve položaja točk v geodeziji in fotogrametriji. Zelo pogosto točne metode določitve položaja uporabljamo za meritve premikov in deformacij premostitvenih objektov, jezov in plazovitih terenov. Meritve GNSS so osnova za vključitev izmere v državni koordinatni sistem, če datum le-tega temelji na referenčni ploskvi in meritvah enega od sistemov GNSS, kot npr. velja tudi v Sloveniji. Sistem GNSS vsebuje tudi zelo točne ure, zato lahko sprejemnik GNSS posreduje referenčni čas aplikacijam, ki zahtevajo točne podatke o času.

2.5 HS GNSS

Sateliti GPS oddajajo kodo C/A na nosilnem valovanju L_1 s pribl. močjo 27 W. S tem ustrezajo specifikacijam v ARINC (2000), ki definirajo najmanjšo moč signala na Zemljini površini, t.j. - 160 dBW. Enota dBW opisuje logaritmično razmerje moči v primerjavi z 1

Wattom, enota dBm, ki se tudi pogosto pojavlja, pa razmerje moči v primerjavi z 1 miliWattom. Vrednost - 160 dBW ustreza moči 10^{-16} W in je enakovredna - 130 dBm.

Sprejemniki GNSS so sposobni določiti svoj položaj samo v primeru, če sprejemajo signale z vsaj štirih satelitov, ki so v t.i. liniji vidnosti ob upoštevanju prve Fresnelove cone. Na območjih z gosto vegetacijo, v urbanih okoljih in znotraj objektov je pogosto nemogoče zagotoviti zadostno število t.i. neoslabljenih signalov. Problem rešujejo t.i. visoko občutljivi sprejemniki GPS¹. Sprejemniki HS GPS (angl. High Sensitivity GPS) so zmožni sprejemati signale z močjo, manjšo od - 180 dBW. Višjo občutljivost ti sprejemniki dosežejo s podaljševanjem časa integracije signala na več kot tipičnih 2-5 ms, kot navaja npr. Wieser (2006). Lachapelle (2004) opisuje dva načina integracije. Koherentno integracijo lahko izvajamo na intervalih do 20 ms zaradi omejene dolžine navigacijskega sporočila. V primeru daljše integracije uporabimo nekoherentno tehniko, ki kvadrira fazna opazovanja. Kvadriranje opazovanj potencira tudi šum, kar zmanjša učinek daljše integracije. Čas integracije lahko podaljšamo na več 100 milisekund.

Daljši čas integracije ni edina bistvena razlika med običajnimi in HS sprejemniki. Kot trdi Schwieger (2007), bi zgolj s podaljševanjem časa integracije vseeno trajalo več ur za zaznavanje zelo šibkih signalov. Zato sprejemniki HS GPS vsebujejo veliko več korelatorjev kot običajni sprejemniki GPS. Običajne vrednosti za HS GPS so nekaj 100.000 korelatorjev, medtem ko so proizvajalci, kot npr. u-blox, že predstavili čipe GPS, ki vsebujejo tudi 2 milijona korelatorjev. Običajni sprejemniki delajo z 12, 24, 36, 48 oz. 60 korelatorji.

2.5.1 Razmerje moči in šuma signala

Kritični parameter pri zaznavanju in sledenju signalov, sodeč po Wieser (2006), ni absolutna moč signala, temveč razmerje signala in šuma SNR (angl. Signal-to-Noise Ratio) oz. še bolj specifično SNR v pasovni širini 1 Hz, kar predstavlja razmerje gostote nosilnega valovanja in

¹ Trenutno obstajajo zgolj visoko občutljivi sprejemniki, ki zaznavajo satelite sistema GPS, zato v nadaljevanju oznaka HS GPS. V prihodnosti lahko pričakujemo tovrstne sprejemnike tudi za ostale sisteme GNSS.

šuma (oznaka C/N_0 , angl. Carrier-to-noise power density ratio). Moč signala - 160 dBW tipično ustreza vrednosti C/N_0 med 41 in 44 dBHz.

Običajni sprejemniki GPS sprejemajo signale, ki imajo vrednost C/N_0 večjo od 33-35 dBHz, kar praktično pomeni, da lahko sprejemajo zgolj signale s satelitov, ki so v t.i. liniji vidnosti. Signali, ki prečijo fizično oviro, so običajno preslabotni za običajne sprejemnike GPS, kot trdi Wieser (2006).

Moč signala upade ob prehodu skozi katerikoli medij razen brezzračnega prostora. V normalnih pogojih že sama atmosfera oslabi signal za približno 1 dB, kot navaja Lachapelle (2004). Tipične vrednosti oslabitve signala ob prehodu skozi različne snovi, povzeto po Qinetiq (2005), so:

- steklo (19 mm) 3,5 dB
- suh les (76mm) 4,3 dB
- moker les 5,5 dB
- suha opeka 5,0 dB
- beton (203 mm) 26,0 dB
- armiran beton (203 mm) 29,0 dB

Največja oslabitve signala je po pričakovanjih v grajenih objektih.

2.5.2 Zaznavanje in sledenje signalov

Čas, ki ga sprejemnik porabi za določitev prvega položaja TTF (angl. Time To First Fix), je odvisen od podatkov, ki jih ima sprejemnik na razpolago za položaj, kjer se nahaja. T.i. vroči zagon (angl. hot start) pomeni, da ima sprejemnik podatke o efemeridah za vsak satelit, almanah vseh satelitov, točen čas in ima svež podatek o svojem predhodnem položaju. Vroči zagon se običajno zgodi, kadar instrument za kratek čas, npr. nekaj sekund, prekine sledenje signalov. TTF v takem primeru traja okoli 1 sekunde. Kadar sprejemnik izvaja t.i. topel zagon (angl. warm start), ima aktualni almanah, podatki o položaju in času pa so samo približni. Običajno TTF v tem primeru traja več kot 30 sekund. T.i. hladni zagon (angl. cold

start) pomeni, da sprejemnik nima nobenih informacij oz. so te prestare in mora sprejeti nov almanah, zaznati vse satelite in pridobiti podatek o točnem času. TTFF pri hladnem zagonu po navedbah proizvajalcev traja nekaj sekund dlje kot pri toplen zagonu. Navigacijsko sporočilo z informacijami, ki so nujne za določitev položaja, lahko sprejemnik prenese samo v primeru koherentne integracije opazovanj, kar pomeni, da signal ne sme biti prešibak. V zelo oteženih pogojih, npr. v notranjosti objektov, je torej hladni zagon zelo težko izvesti.

Postopek pridobivanja vseh potrebnih podatkov za določitev prvega položaja, torej sama opazovanja, efemeride, almanah in čas, imenujemo zaznavanje (angl. acquisition). Ko sprejemnik pridobi osnovne podatke, preide v fazo sledenja (angl. tracking). Sprejemniki praviloma potrebujejo za zaznavanje močnejše signale kot za sledenje. Tipične vrednosti navajamo v preglednici 2-1.

Zaznavanje v primeru hladnega zagona lahko pohitri in v oteženih pogojih olajša t.i. AGPS (angl. assisted GPS). Po dognanjih Wieserja in Hartingerja (2006) je potrebno sprejemniku GPS za fazo zaznavanja signalov priskrbeti zunanje informacije za signale, ki so šibkejši od 28 dBHz, saj takrat zaradi nekoherentne integracije opazovanj ni možno sprejemati navigacijskega sporočila. Koristne informacije, ki jih lahko posredujemo sprejemniku GPS, so: položaj sprejemnika, položaj satelitov, hitrost uporabnika in satelitov ter podatek o času. Kot navaja Schwieger (2007), mora sprejemnik za prenos celotnega navigacijskega sporočila neprekinjeno 12,5 minut slediti vsaj enemu satelitu, za efemeride je dovolj 30 sekund. V zelo oteženih pogojih, kot so znotraj objektov, je pogosto tudi takšen čas težko doseči. Zato lahko sprejemniku GPS pomagamo določiti položaj na tak način, da mu dodatne podatke posredujemo po drugi poti, običajno preko mobilnega GSM oz. UMTS omrežja. Kot je razvidno iz preglednice 2-1, se občutljivost v primeru AGPS zviša za okvirno 10-krat. Po navedbah proizvajalcev se v tem primeru precej skrajša tudi TTFF, ki se npr. za čipe SiRFstar skrajša s 35 sekund na približno 5 sekund.

2.5.3 Modeli HS GPS

Visoko občutljivi senzori so vgrajeni v večini novejših navigacijskih naprav. Največ naprav vsebuje čip podjetja SiRF, prodirajo pa tudi drugi proizvajalci, kot so u-blox, QinetiQ, MTK in drugi. Moduli so že tako majhni, da jih dejansko lahko vgradijo v vsako elektronsko napravo. Poleg namenskih navigacijskih naprav čipe GPS vgrajujejo v mobilne telefone, digitalne fotoaparate, ročne ure, lahko so v obliki ključa USB ipd.

Pregled aktualnih čipov največjih proizvajalcev visoko občutljivih čipov z osnovnimi značilnostmi podajamo v preglednici 2-1. Proizvajalci ponavadi v specifikacijah navajajo tudi podatek o horizontalni točnosti, ki je običajno nekaj metrov, kar je zelo pretirano, zato ti podatki v preglednici niso navedeni.

Preglednica 2-1: Pregled HS GPS čipov na trgu

Table 2-1: Overview of HS GPS chips on the market

proizvajalec	SiRF		u-blox		QinetiQ
spletna stran	www.sirf.com		www.u-blox.com		www.qinetiq.com
čip	SiRFstarIII	SiRFstarIV	u-blox 5	u-blox 6	Q20
občutljivost					
zaznavanje*	- 172 dBW	- 178 dBW	- 171 dBW	- 177 dBW	- 174 dBW
zaznavanje AGPS	- 185 dBW	- 188 dBW	np	np	- 185 dBW
sledenje	- 189 dBW	- 193 dBW	- 189 dBW	- 190 dBW	- 189 dBW
število korelatorjev	> 200.000	np	> 1.000.000	> 2.000.000	np
število kanalov	20	48	50	np	np
TTFF					
vroč zagon	< 1 s	< 1 s	< 1 s	< 1 s	< 1 s
topel zagon	< 35 s	< 35 s	36 s	np	< 38 s
hladen zagon	< 35 s	< 35 s	36 s	np	< 45 s
dim. čipa (mm)	7 x 7 x 1,2	3,4 x 2,7 x 0,7	6,5 x 8 x 1,2	np	22 x 26,5 x 3,3

* hladen zagon

np: ni podatka

Podjetje u-blox ponuja senzorje GPS v obliki čipov in modulov, ki so namenjeni vgradnji v razne naprave, ter v obliki preizkusnega seta (angl. evaluation kit). Slednji deluje samostojno, preko kabla USB ga povežemo z računalnikom ali dlančnikom, kjer lahko beležimo meritve in analiziramo delovanje instrumenta. Poleg tega je u-blox edini ponudnik opreme HS GPS, ki omogoča tudi pretok surovih podatkov opazovanj k uporabniku, medtem ko ostali posredujejo samo rezultate obdelave opazovanj. Zgolj surova opazovanja pa uporabniku omogočajo obdelavo, analizo in vrednotenje opazovanj v lastnih algoritmih. Primera modula GPS in preizkusnega seta s pripadajočo anteno sta prikazana na sliki 2-2.



Slika 2-2: Modul GPS (levo) in preizkusni set (desno) – vir: spletna stran u-blox

Fig 2-2: GPS module (left) and evaluation kit (right)

Antena GPS je tisti del instrumenta, ki dejansko sprejema signale s satelitov. V splošnem ločimo dva tipa anten, ki jih lahko priključimo na module GPS. T.i. patch antene so običajno v obliki ploščice in so aktivne, kar pomeni, da vsebujejo ojačevalca signalov. Drug tip anten so t.i. geohelix, ki so praviloma v obliki valja, so pa pasivne, torej nimajo ojačevalca signalov. Oba tipa anten sta prikazana na sliki 2-3.



Slika 2-3: Antena tipa »patch« (levo) in antena tipa »geohelix« (desno) – vir: spletne strani proizvajalcev

Fig 2-3: Patch antenna (left) and geohelix antenna (right)

Oba tipa anten se med seboj ločita tudi po načinu delovanja, vsaka ima svoje dobre lastnosti in tudi slabosti. Antene »geohelix« naj bi bile manj občutljive na orientacijo (usmerjenost) antene, prav tako naj bi na njeno delovanje manj vplivala neposredna bližina človeških tkiv. Prednost antene »patch« je vgrajen ojačevalec, ki ojača signal, ki ga antena posreduje sprejemniku.

Bistvo katerekoli antene GPS je sprejem krožno polariziranih signalov, ki jih oddajajo sateliti GPS. Za ta namen mora antena tvoriti t.i. efekt krožečega dipola.

2.5.4 Posredovanje obdelanih ali surovih podatkov s sprejemnika

Vsi sprejemniki GPS, tako običajni kot visoko občutljivi, obdelane meritve uporabniku posredujejo v standardni obliki NMEA. Organizacija NMEA (angl. National Marine Electronics Association) je definirala specifikacije za podatkovno komunikacijo med pomorskimi napravami, kot so sonarji, anemometri, žirompasji, avtopiloti in GPS. Standard NMEA 0183 definira pretok podatkov v obliki ASCII (angl. American Standard Code for Information Interchange) preko serijske povezave. Instrumenti GPS svoje podatke posredujejo v obliki različnih stavkov, ki pa vsi ustrezajo standardu NMEA. Sprejemniki lahko podatke prenašajo tudi v interni obliki, vendar pa vsi instrumenti zaradi združljivosti z ostalimi napravami podpirajo tudi zapis NMEA. Obstaja množica različnih stavkov NMEA, večina instrumentov pa omogoča uporabniku izbrati, katere stavke naj posreduje. Glede na potrebe lahko uporabnik vklopi stavke, ki so npr. namenjeni zgolj podajanju položaja, lahko ga zanimajo samo navigacijski parametri (hitrost, smer gibanja, smer cilja, oddaljenost od cilja ipd.), ali pa vključi podatke o satelitih, kot so lege satelitov in moči signalov s satelitov. Ker je zahtevana pasovna širina za posamezen stavek zelo nizka, lahko instrument za vsak posamezen trenutek opazovanj posreduje več različnih stavkov.

Najbolj razširjen stavek, ki podaja najbolj osnovne informacije, ki zanimajo povprečnega uporabnika, poleg tega ga podpirajo vsi instrumenti, se imenuje GGA. Primer stavka GGA z razlago členov:

\$GPGGA,133731.00,4602.74596,N,01429.72763,E,1,07,1.24,304.5,M,44.4,M,,*5E

\$GPGGA	oznaka stavka
133731.00	čas registracije položaja; 13:37:31 UTC
4602.74596,N	elipsoidna širina (WGS-84) 46°02,74596' severno
01429.72763,E	elipsoidna dolžina (WGS-84) 14°29,72763' vzhodno
1	način zajema – 0: onemogočen, 1: GPS, 2: DGPS, 3: PPS, 4: RTK fixed, 5: RTK float (odvisno od verzije standarda)
07	število razpoložljivih satelitov
1.24	HDOP
304.5,M	nadmorska višina, v metrih
44.4,M	geoidna višina elipsoida WGS84, v metrih
<i>prazno</i>	čas v sekundah od zadnjega prejetega sporočila DGPS
<i>prazno</i>	oznaka bazne postaje DGPS
*5E	kontrolna sekvenca, vedno se začne z znakom *

Podatki, ki jih instrument posreduje v obliki NMEA, so rezultat obdelave podatkov opazovanj GPS v samem instrumentu. Če želi uporabnik podatke opazovanj obdelati in analizirati z lastnimi algoritmi, mora s sprejemnika pridobiti podatke surovih opazovanj, t.j. vrednosti kodnih psevdo razdalj in, če instrument omogoča, tudi vrednosti faznih in Dopplerjevih opazovanj ter razmerje moči signala in šuma za posamezen signal.

Sprejemniki u-blox podatke opazovanj posredujejo v binarni obliki v internem formatu UBX RXM-RAW. Specifikacija stavkov UBX je opisana v dokumentu Protocol Specification, ki ga lahko prenesemo s spletne strani podjetja u-blox. Sprejemnik v binarni obliki posreduje naslednje podatke:

- Čas v tednu, v milisekundah,
- Številka tedna GPS,
- Število satelitov,
- Fazna opazovanja, v večkratniku valovne dolžine L1,
- Kodne psevdo razdalje, v metrih,
- Dopplerjev efekt, v Hz, in
- Razmerje moči signala in šuma (C/N_0), v dBHz.

Podatke opazovanj lahko v trajni obliki shranimo v besedilnih datotekah. Datoteke so praviloma zapisane v standardni obliki RINEX (angl. Receiver INdependent Exchange). Standard RINEX določa pravila za zapis podatkov opazovanj, navigacijskih sporočil in meteoroloških podatkov. V isto datoteko lahko zapišemo opazovanja GPS, GLONASS in geostacionarnih satelitov sistemov SBAS. Vsaka datoteka RINEX se prične z glavo, ki vsebuje osnovne informacije o opremi, približnem položaju, tipih opazovanj in začetnem trenutku opazovanj. Nato sledijo zapisi merjenih vrednosti posameznih tipov opazovanj za vsako epoho in vsak satelit.

2.5.5 Uporaba sprejemnikov HS GPS in vplivi na opazovanja v oteženih pogojih

Sprejemniki HS GPS so glede na običajne sprejemnike GPS zelo razširili območje uporabe. Običajni sprejemniki GPS zahtevajo zelo dobre pogoje za sprejem satelitov in malo ovir v bližini sprejemnika. Ti sprejemniki odpovejo v gosti vegetaciji, v neposredni bližini stavb, pa seveda tudi v notranjosti stavb. Sprejemniki HS GPS delujejo tudi v območjih z gosto vegetacijo ter skoraj kjerkoli izven grajenih objektov, tudi npr. v vozilih. Pogojno delujejo tudi znotraj stavb, razpoložljivost je v tem primeru odvisna od geometrije in konstrukcije stavbe. Običajno je delovanje omejeno na zgornje etaže in bližine zunanjih sten in oken. Delovanje sprejemnikov v stavbah je odvisno tudi od tega, kje je instrument izvedel postopek zaznavanja signalov s satelitov (t.i. hladen zagon). Kot smo že omenili, je ta postopek v notranjosti stavb brez dodatnih informacij zelo težko izvesti. Sprejemnik je zato smiselno vklopiti izven objekta, da lahko sprejemnik sprejme almanah, efemeride ter določi točen čas in svoj položaj, potem pa vstopiti v stavbo. Običajno zadošča tudi, če sprejemnik za nekaj časa pomolimo skozi okno.

Vplivi na opazovanja s sprejemniki HS GPS so isti, kot veljajo za vsa opazovanja GPS in smo jih navedli v 2.2. Najbolj izrazit pogrešek v primeru opazovanj v oteženih pogojih je večpotje oz. »multipath«. Na območjih z veliko ovir okoli sprejemnika bo imel pogrešek večpotja največji vpliv na skupni pogrešek položaja, kot trdi tudi Lachapelle (2004). Ostali pogreški imajo podobno velikost kot pri opazovanjih v normalnih pogojih.

Poznamo več metod modeliranja vplivov na opazovanja v normalnih pogojih. Največji napredek v smislu točnosti položaja omogoča diferencialna fazna metoda določitve položaja oz. t.i. DGPS v primeru kodnih opazovanj. Metoda temelji na predpostavki, da so vplivi in pogreški za oba sprejemnika, tako referenčnega kot premičnega, podobni, kar pomeni, da sprejemnika delujeta v podobnih pogojih. V primeru opazovanj v oteženih pogojih je to nemogoče realizirati. V postopku diferenciacije se namreč vrednost šuma in večpotja ojača, kot navaja Lachapelle (2007). DGPS v primeru opazovanj v oteženih pogojih torej ni smiselno, kar dokazujejo tudi preizkusi v nadaljevanju naloge.

Sprejem signalov v oteženih pogojih je problematičen tudi v primeru signalov, ki jih pošiljajo sateliti SBAS. Kot trdita Chen in Li (2004), mora imeti sprejemnik direktno povezavo do satelita, kar je pogosto zelo oteženo v urbanih okoljih. Torej SBAS v oteženih pogojih praviloma ni na razpolago. Pri teh popravkih velja enaka predpostavka kot pri DGPS, t.j. sprejemnik deluje v normalnih pogojih za sprejem signalov s satelitov. Tudi če bi sprejemnik zaznal signale SBAS, lahko sklepamo, da popravki SBAS ne bi bistveno pripomogli k boljši rešitvi, lahko pa bi celo poslabšali doseženo točnost položaja.

2.6 Pregled raziskav na področju navigacije v oteženih pogojih

Visoko občutljivi sprejemniki GNSS so relativno sveža veja v tehnološkem razvoju sistemov GNSS, zato je malo raziskovalnih objav iz te tematike. V nadaljevanju predstavljamo najbolj pomembne izsledke nekaterih raziskav.

Lachapelle (2004) na začetku članka »GNSS Indoor Location Technologies« navaja razlog za razvoj sprejemnikov GNSS v smeri zmožnosti lociranja uporabnika tudi v oteženih pogojih in znotraj objektov. Ameriška agencija Federal Communications Commission je namreč leta 1999 izdala odlok o zahtevi po samodejnem lociranju klica v sili. Zahtevana točnost lokacije klica z mobilnega telefona je 150 m v 95 % primerov. Med najbolj obetavne metode za doseg te točnosti so uvrstili tudi GPS, ampak pod pogojem, da bi deloval v oteženih pogojih, kot so urbani kanjoni, gozdovi in notranjosti objektov. Avtor vsa navedena okolja z namenom

poenostavljanja označuje z oznako »indoor«. Avtorjeve pogloblitve ugotovitve glede razpoložljivosti, točnosti, nepretrganosti in zanesljivosti so naslednje:

- Število razpoložljivih satelitov in njihova geometrija omejujejo razpoložljivost sistema. Signali, ki vpadajo pod nizkim višinskim kotom, običajno niso na razpolago zaradi prevelike oslabitve moči signala.
- Na doseženo točnost določitve položaja vplivajo visok šum, odbiti signali in oslabiljena geometrijska razporeditev satelitov. To so pogloblitvi vzroki za zelo znižano točnost določitve položaja v okoljih »indoor«.
- V oteženih pogojih je stalnost oz. nepretrganost sledenja signalov velik problem zaradi hitre časovne in prostorske dekorelacije večpotja in hitre spremembe geometrijske razporeditve satelitov.
- Zanesljivost je nizka, tudi zaradi nizke nadštevilnosti. Zanesljivost lahko izboljšajo dodatni senzorji, zunanja pomoč ali ustrezno filtriranje.

V članku avtor opisuje delovanje HS GPS v različnih testnih okoljih. V lesenem skednju je bila oslabitev signalov manjša od 10 dB. Točnost položajev je okoli 5 m. Običajni sprejemnik GPS ni zaznal nobenega signala. V naslednjem primeru so sprejemnik postavili v garažo tipične severno-ameriške hiše. Lesena vrata garaže so bila zaprta, sprejemnik so predhodno zagnali izven hiše. Oslabitev signalov je bila med 10 in 30 dB, toda kljub temu so dosegli horizontalno točnost okoli 10 m, z največjim pogreškom 30 m. Test v športni dvorani so izvedli z dvema antenama na stalni medsebojni oddaljenosti 1 m. Oslabitev signalov je bila podobna kot v hiši iz predhodnega primera, horizontalna točnost pa je bila z eno anteno približno 45 m, z dvema pa 25 m. Razpoložljivost je bila 87 %. Glavna ugotovitev testa je, da sta dosežena točnost in stopnja oslabitve signala zgolj delno korelirana ter da imata pomembno vlogo tudi notranja geometrija objekta in odbojnost signalov. V poslovnem objektu je bila oslabitev med 15 in 30 dB, horizontalna točnost pa okoli 75 m.

Avtor zaključuje članek z napovedjo izboljšav na naslednjih področjih: boljše sledenje signalov, uporaba novih signalov GPS in Galileo ter zunanja pomoč.

Lachapelle (2007) v članku »Pedestrian navigation with high sensitivity GPS receivers and MEMS« opisuje navigacijo oseb v oteženih pogojih s pomočjo sprejemnikov GPS in inercialnih senzorjev MEMS (angl. Micro Electro Mechanical Systems). Enote MEMS so

lahko zelo majhne in lahke, vendar pa so zelo nagnjene k pogreškom drsenja (angl. drift), ki s časom narašča, so pa tudi občutljive na temperaturne spremembe. Tipične vrednosti skupin pogreškov so naslednje: pogreški v satelitih (orbite, ure) 5-10 m, pogreški med potovanjem signala (atmosfera, večpotje) 5-10 m, pogreški v sprejemniku (antene, ure, šum) manj kot 1 m. Kvadratni koren iz vsote kvadratov zgoraj naštetih pogreškov imenujemo UERE (angl. User Equivalent Range Error). V normalnih pogojih je vrednost UERE manjša kot 10 m. Položajni pogrešek dobimo tako, da UERE pomnožimo z ustreznim faktorjem DOP. Horizontalni DOP (HDOP) je v normalnih pogojih praviloma manjši od 2. Vertikalni DOP (VDOP) je običajno za 1,5-krat večji kot HDOP. Vrednost HDOP, ki večja od 5, smatramo kot šibko, večjo od 10 pa kot zelo šibko in te naj ne bi uporabljali. Kadar je HDOP manjši od 2, UERE pa manjši od 10, je torej položajna točnost boljša od 20 m. UERE lahko zmanjšamo z diferencialnim načinom določanja koordinat, kjer pogreške odstranimo ali reduciramo. V tem procesu pa se šum in pogrešek večpotja ojačata. V dobrih pogojih lahko položajna točnost s kodnimi popravki doseže 1 m, v primeru kodnih in faznih opazovanj pa je dosežena položajna točnost na nivoju 1 cm.

V okviru raziskav so opravili test na gozdni poti, obkroženi z visokimi drevesi in gostim rastjem. Oslabitev signalov je bila na nivoju 20-25 dB, razpoložljivost pa preko 99 %. Ker dejanske trajektorije poti niso poznali, so delali analizo na osnovi ponovljivosti izmere. Srednja vrednost odstopanj v horizontalnem položaju med dvema izmerama je bila 15 m, največja odstopanja so dosegla pribl. 50 m. Rezultati so po mnenju avtorja boljši od pričakovanj po predhodnih teoretičnih analizah. Glavni razlogi za to naj bi bili skoraj polna razpoložljivost satelitov ter razpršenost in naključnost pogreška večpotja. Test z združitvijo GPS in MEMS na ulicah v centru mesta kaže na delno izboljšanje rezultatov. Razpoložljivost je skoraj 100 %, nepretrganost je načeloma dobra, položajna točnost pa še vedno nizka. 95 % položajev je znotraj 150 m ob 95 % stopnji zaupanja.

Schön in Bieleberg (2008) v članku »On the capability of high sensitivity GPS for precise indoor positioning« opisujeta preizkus sprejemnika HS GPS v zaprtem prostoru v stavbi iz armirano betonskega ogrodja. Signale GPS so sprejemali z vrhunsko geodetsko anteno, signali pa so bili nato obdelani z dvema sprejemnikoma, visoko občutljivim in običajnim geodetskim GPS sprejemnikom. Visoko občutljivi sprejemnik je sprejel 73 %, geodetski sprejemnik pa zgolj 7 % vseh razpoložljivih opazovanj. V raziskavi sta avtorja ugotavljala

povezavo odstopanja kodne psevdo razdalje od prave razdalje med sprejemnikom in satelitom z razmerjem moči in šuma signala C/N_0 . Glede na opazovanja z različnih satelitov je bilo razvidno, da je velik padec vrednosti C/N_0 zelo povezan s povečanjem nemodeliranih vplivov na določitev položaja. Razmerje moči in šuma signala je torej lahko merilo za kakovost signala v notranjosti objektov, posledično pa lahko pridobimo boljšo rešitev z dodelitvijo uteži opazovanjem na osnovi vrednosti C/N_0 . V normalnih pogojih zaradi večjih atmosferskih vplivov na signale z nizkim višinskim kotom običajno uporabimo uteži, ki zmanjšajo vpliv teh opazovanj. V oteženih pogojih pa je situacija drugačna. Atmosferski vplivi niso več dominantni. Največji vplivi so povezani z objektom – večpotje, lom, odboj in uklon signalov. Obnašanje signalov v takih okoljih je zelo težko modelirati. Avtorja navajata, da sta z utežmi na osnovi višinskega kota signalov dosegla celo slabše rezultate, tj. večjo razpršenost položajev, še posebej to velja za višinsko komponento. Z ustreznim določanjem uteži opazovanj na osnovi razmerja signala in šuma signala pa sta dosegla izboljšanje točnosti do 40 % za posamezne položaje in 70 % za srednjo vrednost.

Schwieger (2007) razmišlja o prihodnosti cenениh in visoko občutljivih sprejemnikov GNSS v članku »High-Sensitivity GPS - the Low Cost Future of GNSS ?!«. Evropska komisija predvideva, da imajo geodetske aplikacije samo 1-odstotni tržni delež GNSS. Cenovno dostopni sprejemniki GNSS so vgrajeni v razne naprave, kot so npr. navigacijski instrumenti, dlančniki, mobilni telefoni in drugo. Tržni delež za tovrstne instrumente naj bi znašal več kot 85 % vseh sprejemnikov GNSS. V članku avtor predstavlja rezultate testiranja treh različnih sprejemnikov HS GPS v različnih okoljih: t.i. odprti horizont, obilno večpotje in znotraj objekta. V normalnih pogojih so rezultati podobni za vse instrumente, srednji kvadratni pogrešek 3R položaja (3R RMS) je okoli 5 m, razpoložljivost 100 % ali malenkost manjša. V okolju z velikim vplivom večpotja so imeli vsi instrumenti 3R RMS okoli 35 m, razpoložljivost pa okoli 85 %. V notranjosti objekta ob oknu so vrednosti 3R RMS med 40 in 70 m, razpoložljivost pa med 14 in 87 %.

Izboljšava natančnosti je možna zgolj ob uporabi faznih opazovanj. Natančnost fazne rešitve naj bi bila za faktor 100-krat boljša kot kodna rešitev. Fazna opazovanja naj bi v praksi uporabljali skoraj vsi sprejemniki. Ceneni sprejemniki fazna opazovanja izkoriščajo predvsem za glajenje kodnih opazovanj.

Statični test sprejemnika HS GPS je pokazal, da je možno z naknadno obdelavo opazovanj doseči položajno točnost pribl. 2 cm na vektorju dolžine 1,1 km ob 30-minutnem času opazovanj. Avtor ob tem napoveduje, da bo v bližnji prihodnosti možna uporaba HS GNSS tudi za namene določitve položaja visoke kakovosti.

Wieser (2006) v članku »High-sensitivity GNSS: The trade-off between availability and accuracy« analizira razpoložljivost in točnost sprejemnikov HS GNSS. Slabotni signali po mnenju avtorja običajno niso samo oslabljeni, ampak tudi zakasneni, ker na anteno ne padejo direktno, ampak po odboju ali lomu signala. Pogreški takšnega signala so seveda precej večji od tistega, ki ga antena sprejme direktno. To razliko v kakovosti opazovanj je potrebno upoštevati, kadar se določa položaj, hitrost in čas. V nasprotnem primeru lahko pride do pogreškov, ki znašajo več 100 metrov. Ob primerni obravnavi podatkov pa je možno doseči točnosti znotraj specifikacij GPS SPS tudi v oteženih pogojih. Avtor v članku navaja primer, kjer so s posebno strojno opremo v stavbi zaznali signal, ki je bil za 60 dB slabotnejši kot izven stavbe. Preizkus sprejemnika HS GPS v pisarni je pokazal 95 % razpoložljivost določitve položaja. V drugem preizkusu so testirali visoko občutljivi in enofrekvenčni geodetski sprejemnik. Oba sprejemnika so priključili na isto anteno, katero so postavili blizu betonskega zidu. Sprejemnik HS je sprejemal 71 % vseh teoretično možnih opazovanj in povprečno 6-7 signalov v vsaki epohi, medtem ko je geodetski sprejemnik sprejemal zgolj 51 % vseh možnih opazovanj, povprečno pa 4-5 signalov na epoho. Glede na več različnih testov so prišli do zaključka, da sprejemniki HS GPS tipično sprejemajo signale s šestih satelitov v urbanem okolju izven stavb ter z osmih satelitov pod krošnjami dreves. Običajni sprejemniki sprejemajo do 20 % manj opazovanj pod drevesnimi krošnjami in okoli 60 % manj v urbanih okoljih. V takem okolju običajni sprejemniki niso več uporabni. Opazovanja so naknadno obdelali z natančnimi efemeridami ter modeli troposfere in ionosfere. Glede na znan položaj antene in ovir je avtor ločil analizo kodnih opazovanj na ovirane in neovirane signale. Standardni odklon položajev znaša do 2 m za geodetski ter 6,2 in 2,3 m (prva vrednost za ovirane signale, druga za neovirane) za HS-sprejemnik. Največje odstopanje znaša za geodetski sprejemnik do 10 m, za HS-sprejemnik pa 178 in 56 metrov. Pri geodetskem sprejemniku so statistične vrednosti podobne za obe skupini, pri HS-sprejemniku pa se precej razlikujejo. Razpoložljivost, t.j. vsaj 5 opazovanj tudi po izločitvi grobih pogreškov, je pri geodetskem sprejemniku znašala 49 %, pri HS-sprejemniku pa 98 %. Primerjava uporabe

enotnih varianc in varianc, ki temeljijo na razmerju C/N_0 , pokaže, da so v primeru opazovanj z geodetskim sprejemnikom boljši rezultati z uporabo enotnih varianc (razlike so majhne), medtem ko v primeru HS variance v odvisnosti od C/N_0 prinesejo precej boljše rezultate. Faktor izboljšave je lahko celo večji od 2, npr. razmerje položajnega pogreška 35,8 m : 17,2 m. Avtor zaključuje, da imajo sprejemniki HS GPS nedvomno prednost v okoljih, kjer običajni sprejemniki ne sprejemajo zadosti opazovanj za nedvoumno določitev položaja.

Hide in sod. (2006) so v članku »Low cost, high accuracy positioning in urban environments« opisali rezultate preizkusa sprejemnika HS GPS z vozilom v raznolikem urbanem okolju. V 30 minutah je sprejemnik samo v dveh epohah zaznal manj kot štiri satelite, ki so potrebni za nedvoumno določitev položaja, medtem ko je bila razpoložljivost geodetskega sprejemnika slabša od 50 %. Odstopanja velike večine položajev od referenčne trajektorije so znotraj 10 m, prišlo pa je tudi do velikih odstopanj, največje celo preko 70 m, kljub temu, da je sprejemnik takrat sprejemal signale s sedmih satelitov. Prišlo je tudi do odstopanja 30 m, ko je bil položaj določen iz podatkov z devetih satelitov.

Sprejemnik HS GPS je zmožen delovati tudi v snežnem plazju, kot v članku »Tracking performance of a HSGPS receiver under avalanche deposited snow« pišeta Schleppe in Lachapelle (2007). Sprejemnik HS GPS je zmožal določiti svoj položaj tudi v globini 2,7 m snežnega plazju. Sprejemnik je ob tem zaznal signale, ki so prodirali skozi 15 m debelo plast snega. Povprečna stopnja oslabitve signala na prvih 1,5 m je znašala 11-13 dB. Na globini 2,7 m je znašal horizontalni srednji kvadratni pogrešek (RMS) 6,5 m. Ker gre za statičen primer, so lahko v določenem času s povprečenjem dosegli RMS 2,8 m. Torej bi lahko sprejemnik HS GPS služil tudi kot orodje za hitrejšo iskanje ponesrečencev pod snežnimi plazovi.

Enoten zaključek vseh naštetih raziskav je dejanska zmožnost določitve položaja z HS GPS tudi v oteženih pogojih, kot so gosta vegetacija in urbana okolja, do neke mere pa celo v notranjosti stavb. Primerjave z običajnimi sprejemniki GPS kažejo, da le-ti kaj hitro odpovedo, kadar pogoji za sprejem zadostnega števila signalov s satelitov niso dobri, medtem ko v istih razmerah sprejemniki HS GPS zaznajo zadostno število signalov za nedvoumno določitev položaja. Ob tem pa vsi avtorji poudarjajo, da so v takih pogojih signali ne samo oslabljeni, ampak se pogostokrat tudi odbijejo od odbojnih površin v bližini sprejemnika.

Posledica je netočna določitev položaja. Pogreški segajo tudi čez 100 metrov, kar pa seveda kaže na omejeno zanesljivost takšnega sistema.

Večina omenjenih raziskav temelji na rezultatih obdelave opazovanj v samem sprejemniku. Schön in Bieleberg (2008) sta obdelala podatke opazovanj z lastnim algoritmom, ki temelji na metodi najmanjših kvadratov, pri čemer poteka izračun matrike uteži na osnovi vrednosti C/N_0 . Wieser (2006) sicer omenja model obdelave, ki upošteva vrednosti C/N_0 , ne navaja pa algoritma obdelave.

2.7 Določitev položaja ter modeliranje vplivov in pogreškov

Avtonomna določitev položaja na osnovi kodnih opazovanj je elementaren način obdelave opazovanj sprejemnika GPS za izračun položaja sprejemnika. Določitev položaja v tem primeru temelji na opazovanjih enega samega sprejemnika. Vpliv položaja in urinih stanj satelitov, atmosfere ter ure in šuma sprejemnika je tolikšen, da je skupni pogrešek UERE, kot navaja Lachapelle (2007), v normalnih pogojih za sprejem signalov s satelitov okoli 10 m. Ko to vrednost pomnožimo z ustreznim faktorjem DOP, dobimo približno oceno točnosti položaja. V primeru določitve položaja na osnovi kodnih psevdorazdalj lahko pričakujemo točnost določitve horizontalnega položaja med 10 in 20 m.

2.7.1 Vloga faznih in Dopplerjevih opazovanj pri določitvi položaja

Položaj lahko določimo tudi na osnovi faznih opazovanj. Največji problem pri obravnavi faznih opazovanj je neznanost števila celih valov v začetnem trenutku opazovanj. Postopek določanja teh neznanosti imenujemo inicializacija (angl. ambiguity resolution). Rešitev je lahko realno ali naravno število. Dejansko število bi moralo biti naravno, zato je realna rešitev nepopolna. Fazo valovanja lahko sprejemniki izmerijo z ločljivostjo 1 % valovne dolžine, kar predstavlja mm-natančnost, kot navaja Xu (2007). Postopek inicializacije je temelj za diferencialno določitev položaja na osnovi faznih opazovanj. Za rešitev neznanosti celih valov potrebujemo opazovanja vsaj dveh sprejemnikov, zato pri avtonomni določitvi položaja ne

moremo direktno izračunati razdalj med sprejemnikom in sateliti na osnovi faznih opazovanj. Fazna opazovanja lahko v takem primeru služijo za glajenje kodnih opazovanj, kot npr. opisujeta Kim in Langley (2000). Ista avtorja opozarjata, da lahko v primeru prisotnosti pogreška večpotja pride do konvergence v matematičnem modelu, saj lahko velik pogrešek večpotja »okuži« celoten matematičen model, ki ga tvori t.i. Hatch-filter, ki je najbolj pogost v postopkih glajenja kodnih opazovanj z opazovanji faze. Druga težava je sprememba faze valovanja med prekinitvijo sprejema signala (angl. cycle-slip), ki zahteva ponovno določitev neznanke celih valov, pojav pa je še posebej pogost v oteženih pogojih za sprejem signalov s satelitov.

Pri določanju položaja lahko uporabimo tudi Dopplerjeva opazovanja. Dopplerjev efekt je v splošnem sprememba frekvence valovanja pri spremembi razdalje med opazovalcem in virom valovanja. Pri približevanju je sprejeta frekvenca višja od oddane, pri oddaljevanju pa nižja od oddane. Frekvenca se ne spreminja, če je oddaljenost stalna. V primeru opazovanj GNSS je Dopplerjev efekt posledica relativne spremembe razdalje med sprejemnikom in satelitom in se kaže v spremembi frekvence sprejetega valovanja v sprejemniku.

Vrednost Dopplerjevega efekta je časovni odvod faznih opazovanj, kot trdita Simsky in Boon (2003), zato so tudi sistematični pogreški Dopplerjevih opazovanj časovni odvodi sistematičnih pogreškov faznih opazovanj. Avtorja potrjujeta podobnost Dopplerjevih in faznih opazovanj, navajata pa določene prednosti hitrosti, izračunanih na osnovi Dopplerjevih opazovanj (v nadalj. Dopplerjeve hitrosti), kot so:

- Dopplerjeve hitrosti so na razpolago ves čas, ni treba čakati na določitev neznank celih valov za fazna opazovanja. V dinamičnih okoljih je to pomembna prednost.
- Hitrosti, izračunane iz faznih opazovanj, so pogosto grobe pogrešene ob spremembi števila sprejetih signalov, medtem ko Dopplerjeve hitrosti nimajo teh težav.
- Dopplerjeve hitrosti se nanašajo na isti časovni trenutek kot Dopplerjevo opazovanje, medtem ko imajo hitrosti iz faznih opazovanj referenco v trenutku med trenutno in predhodno epoho.

Sprememba frekvence prejetega valovanja je torej mera za določitev spremembe razdalje med sprejemnikom in oddajnikom. Kadar je hitrost valovanja veliko večja od relativne hitrosti sprejemnik-oddajnik, kar nedvomno velja za opazovanja GPS, še posebej pa za navigacijo oseb, lahko razmerje med oddano in sprejeto frekvenco zapišemo kot (Xu, 2007):

$$f_R = \left(1 - \frac{v_{S,R}}{c}\right) \cdot f_S \quad (2-1)$$

V zgornji enačbi je f_R sprejeta frekvenca, f_S oddana frekvenca s satelita, ki za valovanje L_1 znaša 1575,42 MHz, $v_{S,R}$ je relativna hitrost med satelitom in sprejemnikom in c je hitrost širjenja valovanja, ki je enaka svetlobni hitrosti. Razliko sprejete in oddane frekvence oz. Dopplerjev efekt lahko potemtakem izrazimo kot:

$$\Delta f = f_s - f_R = \frac{v_{S,R}}{c} \cdot f_S = \frac{v_{S,R}}{\lambda} \quad (2-2)$$

V enačbi (2-2) je λ valovna dolžina nosilnega valovanja in za valovanje L_1 znaša $\lambda_{L1} = c / (1575,42 \cdot 10^6) \approx 19 \text{ cm}$. Spremembo razdalje med satelitom in sprejemnikom lahko izračunamo po naslednji enačbi, kjer je dt časovni interval:

$$\Delta \rho = \Delta f \cdot \lambda \cdot dt \quad (2-3)$$

Oddana frekvenca s satelita temelji na zelo točnih atomskih standardih, kot navaja Lehtinen (2002), in je zato zelo blizu nominalni frekvenci. Na drugi strani pa meritev Dopplerjevega efekta v sprejemniku temelji na lokalnem oscilatorju, ki vsebuje tako pogrešek odmika (angl. offset) kot drsenja (angl. drift).

Pri avtonomni določitvi položaja lahko Dopplerjeva opazovanja uporabimo, podobno kot velja za fazna opazovanja, za glajenje kodnih opazovanj z različnimi filtri. Najbolj znan filter za glajenje kodnih opazovanj je t.i. Hatch-filter. Opisujeta ga tudi Nie in Liu (2005), glajenje pa izvajamo po naslednji enačbi:

$$\tilde{P}_{i+1} = \frac{1}{i} P_{i+1} + \frac{i-1}{i} \cdot \left(\tilde{P}_i - \frac{D1_i + D1_{i+1}}{2} \cdot \lambda \cdot \Delta t \right) \quad (2-4)$$

V enačbi (2-4) so: \tilde{P}_{i+1} glajena vrednost psevdo razdalje v naslednji epohi, P_{i+1} merjena psevdo razdalja v naslednji epohi, \tilde{P}_i glajena vrednost v trenutni epohi, $D1_i$ in $D1_{i+1}$ sta Dopplerjevi opazovanji v trenutni in naslednji epohi, λ je valovna dolžina nosilnega valovanja in Δt časovni interval. V začetnih epohah imajo dejanska opazovanja še veliko utež, s časom pa čedalje manjšo, nasprotno pa imajo spremembe psevdo razdalje, ki jih izračunamo iz Dopplerjevih opazovanj, čedalje večjo utež. Smiselnost takšnega načina določitve uteži je vprašljiva, saj ni logično, zakaj bi utež opazovanja s časom zmanjševali, utež sistema pa povečevali.

Lehtinen (2002) opisuje postopek za določitev položaja na osnovi zgolj Dopplerjevih opazovanj, ki pa predpostavlja znano hitrost sprejemnika. Če v matematični model komponente hitrosti sprejemnika vključimo kot neznanke, so potrebna opazovanja z vsaj sedmih satelitov, kar je v oteženih pogojih pogosto težko zagotoviti.

2.7.2 Matematični model avtonomne določitve položaja

Določitev položaja na osnovi opazovanj GPS temelji na izračunu razdalj med sprejemnikom in sateliti v vsakem trenutku meritev. V primeru idealnih ur satelitov in sprejemnika, točnih položajev satelitov in brez vplivov na opazovanja bi razdaljo v brezračnem prostoru izračunali kot časovno razliko med časom oddaje in sprejema signala, pomnoženo s svetlobno hitrostjo. Zaradi netočnih ur in številnih vplivov na opazovanja ima navigacijska enačba za psevdo razdalje naslednjo obliko:

$$P_R^S = \rho_R^S + c \cdot (dTr - dT^S) + I + T + mp + \varepsilon \quad (2-5)$$

V enačbi (2-5) so:

- P_R^S : merjena psevdo razdalja,
- ρ_R^S : geometrijska razdalja med sprejemnikom in satelitom,
- c : svetlobna hitrost $c = 299792458 \text{ m/s}$,
- dTr : popravek urinega stanja sprejemnikove ure,
- dT^S : popravek urinega stanja satelitove ure,
- I : ionosferska refrakcija,
- T : troposferska refrakcija,
- mp : pogrešek večpotja in
- ε : šum sprejemnika.

Geometrijsko razdaljo ρ_R^S izračunamo kot:

$$\rho_R^S = \sqrt{(X^S - X_R)^2 + (Y^S - Y_R)^2 + (Z^S - Z_R)^2} \quad (2-6)$$

V enačbi (2-6) je (X^S, Y^S, Z^S) položaj satelita v trenutku oddaje signala in (X_R, Y_R, Z_R) položaj sprejemnika v času sprejema signala.

V enačbi (2-5) nastopata neznanki mp in ε . Pogrešek večpotja je zelo težko modelirati, saj je v kinematičnih modelih sistematične narave, prav tako je težko oceniti vrednost šuma sprejemnika. Obe neznanki obravnavamo kot nemodelirane pogreške. Navigacijsko enačbo lahko torej poenostavimo:

$$P_R^S = \rho_R^S + c \cdot (dt_R - dt^S) + I + T \quad (2-7)$$

Položaj satelita (X^S, Y^S, Z^S) mora biti znan za vsak trenutek opazovanj. Le-tega lahko izračunamo iz podatkov efemerid, ki vsebujejo tudi vrednost popravka sprejemnikove ure dT^S . Ionosfersko in troposfersko refrakcijo lahko modeliramo z ustreznimi modeli, ki jih predstavljamo v nadaljevanju tega poglavja.

V enačbi (2-7) nastopajo štiri neznanke: položaj sprejemnika (X_R, Y_R, Z_R) in popravek urinega stanja sprejemnikove ure dTr . Za rešitev modela potrebujemo vsaj štiri enačbe, kar pomeni, da moramo imeti za vsak trenutek opazovanja z vsaj štirih satelitov. Štiri opazovanja zagotavljajo enolično rešitev modela, več kot štiri opazovanja pomenijo nadštevilnost. Nadštevilna opazovanja so zelo zaželena, saj omogočajo iskanje grobih pogreškov, višjo točnost in zanesljivost ter pridobitev ocene natančnosti.

Določitev neznank v sistemu enačb (2-7) praviloma poteka v izravnavi po metodi najmanjših kvadratov. Izravnava poteka iterativno, kjer v vsaki iteraciji računamo boljše približke koordinat sprejemnika in popravka sprejemnikove ure. Če iteracijski postopek konvergira, običajno v nekaj korakih dobimo rešitev, ki se od prehodne razlikuje za manj kot je zahtevana natančnost rešitve. Takrat zaključimo iteracijski postopek.

V matematičnem modelu izravnave po metodi najmanjših kvadratov vrstico v vektorju odstopanj f zapišemo kot:

$$f_i = \rho_R^S - P_R^S + dTr - c \cdot dT^S + I + T \quad (2-8)$$

Popravek sprejemnikove ure dTr v enačbi (2-8) je izražen v metrih. Če število opazovanj označimo z n , je velikost vektorja f enaka $n \times 1$.

Normalne enačbe (2-7) moramo linearizirati. V matriko koeficientov neznank B zapišemo delne odvode enačbe po neznankah. Matrika B ima toliko vrstic kot je opazovanj ter toliko stolpcev kot je neznank. Matrika B je torej velika $n \times 4$. Posamezna vrstica v matriki B ima obliko:

$$B_i = \left[\begin{array}{ccc|c} \frac{X^S - X_R}{\rho_R^S} & \frac{Y^S - Y_R}{\rho_R^S} & \frac{Z^S - Z_R}{\rho_R^S} & -1 \end{array} \right] \quad (2-9)$$

Matriko kofaktorjev Q dobimo kot produkt inverzne vrednosti a-priori referenčne variance σ_0^2 in variančno-kovariančne matrike Σ :

$$Q = \frac{1}{\sigma_0^2} \cdot \Sigma \quad (2-10)$$

Matriko Σ po diagonalni tvorijo kvadratne vrednosti standardnih odklonov opazovanj, izvendiagonalne vrednosti pa predstavljajo kovariance med opazovanji, če le-te obstajajo. Če natančnosti opazovanj a-priori niso znane, privzamemo za Σ enotsko matriko. Velikost matrike je $n \times n$. Vrednost σ_0^2 običajno izberemo tako, da so diagonalni členi matrike Q čim bližji vrednosti 1.

Matriko uteži P dobimo z invertiranjem matrike Q :

$$P = Q^{-1} \quad (2-11)$$

Končno rešitev neznank dobimo z izračunom vmesnih matrik N in t :

$$N = B^T P B \quad (2-12)$$

$$t = B^T P f \quad (2-13)$$

Vektor neznank Δ izračunamo kot:

$$\Delta = N^{-1} t \quad (2-14)$$

Vektor Δ ima toliko elementov kot je neznank, torej 4. Če ima matrika B obliko kot v enačbi (2-9), so elementi vektorja Δ po vrsti popravki izravnanih vrednosti za X_R , Y_R , Z_R in dTr .

Vektor popravkov opazovanj v izračunamo po enačbi:

$$v = f - B \Delta \quad (2-15)$$

Po vsakem koraku izravnave izračunamo nove približne vrednosti neznank. Iterativen postopek se zaključi, ko so vrednosti v vektorju neznank Δ manjše od zahtevane natančnosti.

Natančnost končne rešitve ocenimo s standardnim odklonom, ki ga izračunamo z naslednjo enačbo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T P \mathbf{v}}{n - u}} \quad (2-16)$$

V enačbi (2-16) je σ standardni odklon rešitve, n je število opazovanj, u pa najmanjše potrebno število opazovanj za določitev neznank. V splošnem primeru, ko poleg položaja določamo še popravek sprejemnikove ure, je u enak 4.

2.7.3 Uporaba DGPS za določitev položaja

Diferencialna določitev položaja temelji na istočasnem izvajanju opazovanj premičnega in referenčnega sprejemnika. Referenčni sprejemnik mora v času izmere stati na točki z znanim položajem, ki mora biti določen s čim višjo točnostjo. Referenčni sprejemnik sproti določa svoj položaj iz podatkov opazovanj, ki se zaradi vplivov na opazovanja razlikuje od predhodno določenega, t.j. pravega položaja. Na osnovi odstopanj od pravega položaja lahko izračunamo popravke kodnih psevdo razdalj. Ob predpostavki, da so vplivi na opazovanja podobni za vse sprejemnike v bližini referenčnega sprejemnika, lahko izračunane popravke opazovanj za referenčni sprejemnik upoštevamo pri obdelavi opazovanj premičnih sprejemnikov, ki opravljajo izmero za določitev položaja merjenih točk. V primeru t.i. kodnega DGPS je pričakovana točnost določitve položaja premičnega sprejemnika približno 1 m, premični sprejemnik pa je lahko od referenčnega sprejemnika oddaljen tudi do 100 km. Pri diferencialni določitvi položaja lahko upoštevamo tudi fazna opazovanja, ki dvignejo točnost določitve položaja na nekaj centimetrov, vendar moramo predhodno opraviti t.i. inicializacijo, t.j. določitev neznank začetnih celih valov za fazna opazovanja. V oteženih pogojih, kjer pogosto prihaja do t.i. »cycle-slipov«, je uporaba faznih opazovanj otežena, ker je ob pojavu »cycle-slipov« potrebno ponovno določiti neznan začetno število celih valov.

Pri določitvi položaja z DGPS upoštevamo zgolj signale s satelitov, ki jih sprejemata tako premični kot referenčni sprejemnik. Referenčni sprejemnik je lahko lasten, lahko pa za

referenčna opazovanja koristimo opazovanja omrežja permanentnih postaj GNSS, če je le-to na razpolago. V tem primeru lahko izberemo podatke opazovanj za t.i. navidezno referenčno postajo VRS (angl. Virtual Reference Station), ali podatke najbližje stalno delujoče postaje. DGPS lahko izvajamo v resničnem času ali z naknadno obdelavo. Posamezni referenčni sprejemniki oz. računski center omrežja postaj sproti oddajajo svoja opazovanja v standardni obliki RTCM (angl. Radio Technical Commission for Maritime Services). Večina običajnih sprejemnikov GPS podpira način DGPS preko RTCM sporočil. Preizkusni instrumenti HS GPS te možnosti nimajo. Podatke referenčne postaje do premičnega sprejemnika prenesemo preko radijske povezave ali mobilnega omrežja GSM. Naknadni izračun položaja DGPS izvedemo z zapisi referenčnih opazovanj v obliki RINEX, ki jih lahko prenesemo s spletne strani računskega centra omrežja permanentnih postaj.

Matematični model za izračun položaja z DGPS izvedemo s tvorjenjem t.i. enojnih faznih razlik. Rezultat je enak, kot če najprej izračunamo položaj referenčnega sprejemnika iz opazovanj in nato na osnovi znanega položaja sprejemnika izračunamo popravke kodnih psevdo razdalj, ki jih nato uporabimo za popravo merjenih psevdo razdalj premičnega sprejemnika. Z računom enojnih faznih razlik zmanjšamo količino računanja, rezultat je pa isti.

Vektor odstopanj f v primeru avtonomne določitve položaja izračunamo po enačbi (2-8). V primeru DGPS to enačbo razširimo z opazovanji referenčnega sprejemnika:

$$f_i = \rho_R^S - \rho_B^S - \Delta P_{B,R}^S + dTr - c \cdot (dT_R^S - dT_B^S) + I_R + T_R - I_B - T_B \quad (2-17)$$

V enačbi (2-17) so:

- ρ_R^S : geometrijska razdalja med premičnim sprejemnikom in satelitom,
- ρ_B^S : geometrijska razdalja med referenčnim sprejemnikom in satelitom,
- $\Delta P_{B,R}^S$: enojna kodna razlika opazovanj kodnih psevdo razdalj, $\Delta P_{B,R}^S = P_R^S - P_B^S$,
- c : svetlobna hitrost $c = 299792458 \text{ m/s}$,
- dTr : popravek urinega stanja sprejemnikove ure, v tem primeru vključuje oba sprejemnika,

- dT_R^S : popravek urinega stanja satelitove ure v času oddaje signala, ki ga sprejme premični sprejemnik,
- dT_B^S : popravek urinega stanja satelitove ure v času oddaje signala, ki ga sprejme referenčni sprejemnik,
- I_R : ionosferska refrakcija za premični sprejemnik,
- I_B : ionosferska refrakcija za referenčni sprejemnik,
- T_R : troposferska refrakcija za premični sprejemnik,
- T_B : troposferska refrakcija za referenčni sprejemnik.

Razlike popravkov modelov atmosfere za referenčni in premični sprejemnik so zaradi neposredne bližine in istega časa neznatne, zato modelov ionosfere in troposfere ni potrebno upoštevati.

Matrika koeficientov neznank B ima enako obliko kot v (2-9). Postopek izračuna neznank urinega teka sprejemnikove ure in položaja je nato enak kot pri avtonomni določitvi položaja.

2.7.4 Modeliranje ionosferske refrakcije

Kot smo že omenili v 2.2, je ionosfera disperzivni medij, ki različno vpliva na valovanja različnih frekvenc. Vpliv ionosfere lahko odpravimo z linearno kombinacijo opazovanj na različnih frekvencah, npr. L_1 in L_2 v sistemu GPS. Na ta način skoraj v celoti izničimo vpliv ionosfere na kodna in fazna opazovanja, kot navaja Xu (2007). Vsi sprejemniki HS GPS so enofrekvenčni in takšna rešitev ne pride v poštev. V primeru enofrekvenčnih opazovanj lahko uporabimo modele ionosfere, ki uporabljajo podatke o ionosferi iz navigacijskega sporočila. Klobuchar (1991) navaja, da lahko na tak način modeliramo od 50 do 60 % ionosferske refrakcije. Najbolj pogosto uporabljamo Klobucharjev model, kot trdi El-Rabbany (2002). Popravek opazovanj zaradi vpliva ionosfere je odvisen od geodetske širine, geodetske dolžine, višinskega kota sprejetega signala, časa opazovanja in koeficientov α in β iz navigacijskega sporočila. Enačbe za izračun popravka najdemo npr. v Xu (2007).

Ionosferska refrakcija je proporcionalna s številom prostih elektronov vzdolž poti signala GPS, ki jih označimo z TEC (angl. Total Electron Content). TEC je, kot navaja El-Rabbany (2002), odvisen od časa v dnevu (gostota prostih elektronov je najvišja zgodaj popoldne in najnižja okoli polnoči po lokalnem času), časa v letu (gostota je višja pozimi kot poleti), 11-letnega solarnega cikla in geografskega položaja (gostota elektronov je najnižja v območjih srednje geografske širine in zelo nehomogena v polarnih in ekvatorialnih območjih). Ionosfersko refrakcijo lahko modeliramo s pomočjo numeričnih modelov TEC, ki jih izdeluje npr. CODE (angl. Center for Orbit Determination in Europe). Datoteke IONEX (angl. IONosphere EXchange) s podatki TEC lahko uporabimo zgolj za naknadno obdelavo, saj jih moramo prenesti iz svetovnega spleta.

Pri vključitvi modela ionosfere v izračun položaja moramo upoštevati, da ima popravek pozitiven predznak za kodna opazovanja in negativen predznak za fazna in Dopplerjeva opazovanja. Ionosfera namreč pospešuje širjenje faze nosilnega valovanja in zavira širjenje kode. Absolutna vrednost popravka je enaka za vse tipe opazovanj.

2.7.5 Modeliranje troposferske refrakcije

Velikost troposferske refrakcije je v prvi vrsti odvisna od višinskega kota sprejetega signala, pa tudi od temperature, zračnega tlaka, vlage in položaja antene GPS, kot navaja Xu (2007). Model troposfere običajno tvorita dve komponenti: zenitna refrakcija (angl. zenith delay) in projekcijska komponenta (angl. mapping function), ki preslika refrakcijo iz smeri zenita na smer proti satelitu. Za izračun zenitne refrakcije najbolj pogosto uporabimo modela Saastamoinen in Hopfield s svojimi modifikacijami. Enačbe za izračun modelov so npr. v Xu (2007). Poznamo tudi več različnih postopkov izračuna projekcijske komponente, npr. Niell, ki ga omenjajo Dach in sod. (2007), ter GMF (angl. Geometric Mapping Function), ki ga navaja Xu (2007).

2.7.6 Uporaba natančnih efemerid

Sateliti v navigacijskem sporočilu oddajajo podatke o efemeridah satelitov, ki so nujne za določitev položaja satelitov. Efemeride vsebujejo informacije o tirnicah satelitov in urinem stanju satelitovih ur. Oddane efemeride vsebujejo predvidene tirnice in položaje satelitov, zato ne predstavljajo dejanskega položaja satelitov v času oddajanja signalov. Bolj natančne efemeride so na voljo preko spletnih strani z določenim zamikom. Uporabniki najbolj pogosto koristijo izdelke IGS, ki ponujajo različne nivoje točnosti efemerid. Glede na podatke na njihovi spletni strani naj bi bila točnost oddanih tirnic pribl. 1 m. Najhitreje objavijo t.i. ultra-rapid efemeride, pri katerih je ena polovica (12 h) predvidena, druga polovica pa obdelana. Obdelan del efemerid je na voljo z 3-9 urno zakasnitvijo. Točnost teh tirnic je pribl. 5 oz. 3 cm. S pribl. enodnevnim zamikom so na voljo t.i. rapid efemeride. Točnost teh tirnic je pribl. 2,5 cm. Najbolj točne efemeride, t.i. final, so na razpolago 12-18 dni po izmeri. Točnost tirnic je pribl. 2,5 cm. Prenos vseh efemerid je brezplačen.

Smiselnost uporabe natančnih efemerid pri določanju položaja v oteženih pogojih je vprašljiva z vsaj dveh vidikov. Prvi vidik je točnost, saj v takih pogojih natančnost oddanih efemerid povsem zadošča. Pomemben razlog je tudi razpoložljivost natančnih efemerid za aplikacije, ki zahtevajo določitev položaja v resničnem času, saj so vse razen predvidenega dela efemerid »ultra-rapid« na voljo z nekajurnim ali večdnevnim zamikom. Izvedba sprotnega prenosa tovrstnih efemerid je sicer možna, npr. preko sistema AGPS, a to postopek izmere zaplete in podraži.

2.7.7 Utež opazovanja v odvisnosti od višinskega kota signala

Opazovanja pri nizkih višinskih kotih so v splošnem veliko bolj obremenjena z atmosfersko refrakcijo in z vplivom večpotja kot opazovanja pri višjih višinskih kotih. Programski paket Bernese GPS Software (Dach in sod., 2007) uporablja utežno funkcijo:

$$w(z) = \cos^2 z \quad (2-18)$$

Simbol z predstavlja zenitno razdaljo satelita. Utež signala je v zenitu enaka 1, utež signalov na nizkih višinskih kotih se bliža vrednosti 0.

Dodelitev uteži opazovanjem na osnovi višinskega kota sprejetega signala (v nadalj. tudi utež višinskega kota) je, sodeč po Luo in sod. (2008), smiselna v primerih, kjer ni velike prisotnosti večpotja. V takem primeru je korelacija med kakovostjo signala in višinskim kotom visoka. Korelacija se zelo zmanjša v oteženih pogojih, kjer je velik vpliv večpotja in loma signalov, kar v svojih raziskavah potrjujejo Luo in sod. (2008). Utež višinskega kota signala zelo zmanjša vpliv opazovanj z nizkih višinskih kotov, ki po drugi strani lahko pripomorejo pri določitvi zenitne troposferske refrakcije in posledično pri določitvi višinske komponente položaja, kot navajajo Dach in sod. (2007).

2.7.8 Utež opazovanja v odvisnosti od razmerja moči in šuma signala

Utež opazovanja lahko določimo tudi glede na razmerje moči in šuma signala (SNR, C/N_0). Obstaja več enačb za izračun uteži na osnovi razmerja SNR (v nadalj. tudi utež SNR), npr. Luo in sod. (2008) predlagajo naslednjo, ki je vgrajena tudi v programski paket Bernese 5.0:

$$w(SNR) = \left(\frac{SNR_i - SNR_{\min}}{SNR_{\max} - SNR_{\min}} \right)^2 \quad (2-19)$$

V enačbi (2-19) je SNR_i razmerje moči in šuma signala, za katerega določamo utež, SNR_{\min} in SNR_{\max} sta vrednosti najšibkejšega in najmočnejšega signala v epohi. Najšibkejši signal ima potemtakem utež 0 in se ne upošteva v obdelavi. Kirchner in Becker (2005) predlagata model, ki skrči interval izračunanih uteži:

$$w(SNR) = (1 - 2m) \frac{SNR_i - SNR_{\min}}{SNR_{\max} - SNR_{\min}} + m \quad (2-20)$$

Parameter m predstavlja faktor krčenja intervala, npr. za $m = 0,05$ dobimo interval za vrednosti uteži $[0,05 \dots 0,95]$. Najšibkejši signal v epohi dobi utež enako m , najmočnejši signal pa utež $(1 - m)$.

2.7.9 Odkrivanje in izločanje grobih pogreškov

Pri opazovanjih GPS v oteženih pogojih se pogosto pojavi grobi pogrešek. V posamezni epohi opazovanj se lahko pojavijo grobo pogrešena opazovanja z enega ali tudi z več satelitov. Kakovostna rešitev naj ne bi vsebovala grobih pogreškov, zato težimo k temu, da morebitne grobe pogreške odkrijemo in odstranimo ali pa zmanjšamo njihov vpliv na najmanjši možni nivo. Grobe pogreške lahko odkrivamo z metodami robustne statistike, ki jih predstavljamo v 3.2, ali z običajnimi statističnimi metodami, ki delujejo na principu potrditve ali zavrnitve postavljene hipoteze. Nekaj tovrstnih metod opisuje El-Mowafy (2009).

V okviru raziskav bomo ugotovili, ali je v primeru opazovanj GPS v oteženih pogojih smiselno uporabiti obstoječe metode odkrivanja in izločanja grobih pogreškov in kako zanesljivo je odkrivanje grobih pogreškov. Pretirano izločanje opazovanj lahko namreč vodi do kritičnega zmanjšanja nadštevilnosti opazovanj ali celo do nedoločenega sistema. Lahko se celo pripeti, da iz sistema izločimo opazovanje, ki ni grobo pogrešeno. Z grobimi pogreški moramo torej ravnati previdno.

3 RAZVOJ LASTNIH POSTOPKOV OBDELAVE OPAZOVANJ

V tem poglavju opisujemo običajne metode obdelave opazovanj sprejemnikov HS GPS, ki smo jih nadgradili z lastno razvitimi postopki, katerih namen je zmanjšanje vpliva grobih pogreškov ter izboljšanje kakovosti določitve položaja v oteženih pogojih za sprejem signalov s satelitov.

3.1 Tipi opazovanj in metoda najmanjših kvadratov

Osnovni način avtonomne določitve položaja je izravnava podatkov kodnih psevdo razdalj po metodi najmanjših kvadratov. Metoda v nemotenih pogojih za sprejem signalov s satelitov omogoča doseg horizontalne točnosti okoli 10 m. V oteženih pogojih, še posebej ob prisotnosti pogreška večpotja, dosežena točnost zelo pade, tudi nad 100 metrov.

Kodna opazovanja so v oteženih pogojih zelo obremenjena s pogreškom večpotja, zato lahko izračunani položaj zelo odstopa od dejanskega. Kakovostna rešitev posledično ne sme temeljiti zgolj na kodnih opazovanjih. Kot smo omenili v 2.5.4, nudijo preizkusni instrumenti poleg kodnih tudi fazna in Dopplerjeva opazovanja. Za testiranje opreme in algoritmov smo uporabili dva preizkusna seta podjetja u-blox, AEK-4T in EVK-5T. Trenutno sta to edina instrumenta HS GPS na prostem trgu, ki omogočata posredovanje podatkov opazovanj. Poglavitna razlika med njima je, da model AEK-4T posreduje fazna opazovanja zgolj za signale z vrednostjo SNR večjo od 30. Takšno razmerje moči in šuma signala v oteženih pogojih dosega le malo signalov, večinoma so to signali, ki vpadejo neposredno na anteno in ne prečijo nobene fizične ovire. Model EVK-5T posreduje fazna opazovanja tudi za zelo šibke signale.

Ker preizkušanje postopkov in opreme ne more temeljiti samo na enem instrumentu, lastno razviti postopki za določitev položaja temeljijo na kodnih in Dopplerjevih opazovanjih. Kot smo navedli v predhodnem poglavju, imajo Dopplerjeva opazovanja podobne značilnosti kot fazna, imajo pa tudi določene prednosti, najbolj pomembna je neobčutljivost na »cycle-slip«,

ki je v oteženih pogojih zelo pogost, v primeru faznih opazovanj pa zahteva ponovno določitev neznanke celih valov.

Metoda najmanjših kvadratov je najbolj osnoven in najbolj pogost način obdelave nadštevilnih opazovanj. Bistvo metode je minimizacija funkcije vsote kvadratov popravkov. V primeru obdelave opazovanj GPS gre za iterativni postopek obdelave, kjer določamo neznanke položaja in urinega stanja sprejemnikove ure. Postopek obdelave vključuje enačbe od (2-8) do (2-15). V prvi iteraciji računamo popravke vnaprej danih približnih vrednosti. Ker približnih vrednosti položaja in urinega stanja največkrat ne poznamo, je ta ocena lahko zelo groba. Izravnane vrednosti prve iteracije nastopijo kot približne vrednosti v drugi iteraciji. Postopek nadaljujemo naprej v tem smislu, kar pomeni, da so izravnane vrednosti poljubne iteracije začetne približne vrednosti v naslednji iteraciji. Če postopek konvergira, so absolutne vrednosti popravkov v vsaki iteraciji manjše kot v predhodni iteraciji. V primeru prisotnosti grobih pogreškov ali nemodeliranih sistematičnih pogreškov se lahko zgodi, da iterativen postopek ne konvergira.

3.2 Metode robustne statistike

Izravnava po metodi najmanjših kvadratov je primerna za obdelavo opazovanj, ki vsebujejo zgolj slučajne pogreške. Kot trdita Baselga in Garcia-Asenjo (2008), je v primeru prisotnosti sistematičnih in grobih pogreškov v opazovanjih metoda najmanjših kvadratov zelo občutljiva na tovrstne pogreške in lahko da napačne rešitve. Vpliv sistematičnih in grobih pogreškov lahko zmanjšamo z uporabo metod robustne statistike. Podobno ugotavljajo tudi Erenoglu in Hekimoglu (2008) ter Amiri-Simkooei (2003). Glede na znano dejstvo, da so pri opazovanjih GPS v oteženih pogojih pogosto prisotni grobi in sistematični pogreški, ki jih zaradi svojstvenih značilnosti ne moremo ustrezno modelirati, so očitno metode robustne statistike obdelave pametna izbira. Baselga in Garcia-Asenjo (2008) navajata tudi, da v primeru prisotnosti zgolj slučajnih pogreškov dajejo metode robustne statistike zelo podobne rezultate kot metoda najmanjših kvadratov.

Bistvo metod robustne statistike je dodelitev uteži opazovanjem z ustrežno utežno funkcijo, optimalno rešitev pa pridobimo v iterativnem postopku metode najmanjših kvadratov. Osnova je torej še vedno metoda najmanjših kvadratov, utežne funkcije pa v vsaki iteraciji določijo nove uteži opazovanj, kot npr. navaja tudi Amiri-Simkooei (2003). Izračun uteži z utežnimi funkcijami temelji na popravku opazovanja v posamezni iteraciji postopka izravnave. Popravek je razlika med merjeno in izravnano vrednostjo opazovanja.

Poznamo več različnih utežnih funkcij. V praksi pogosto uporabljamo t.i. L1-normo, kjer utež izračunamo kot obratno absolutno vrednost popravka:

$$w_i = \frac{1}{|v_i|} \quad (3-1)$$

Če to utežno funkcijo vključimo v postopek metode najmanjših kvadratov, gre potemtakem za minimizacijo vsote absolutnih vrednosti popravkov, kot dokazujeta Baselga in Garcia-Asenjo (2008):

$$\min \sum v_i^2 w_i = \min \sum v_i^2 \frac{1}{|v_i|} = \min \sum |v_i| \quad (3-2)$$

Avtorji programskega paketa MATLAB predlagajo uporabo t.i. bikvadratne utežne funkcije. Za določitev uteži moramo najprej izračunati izravnane popravke po naslednji enačbi:

$$v_{izr} = \frac{v_i}{\sqrt{1-h_i}} \quad (3-3)$$

V zgornji enačbi je v_i popravek, ki ga izračunamo po metodi najmanjših kvadratov, h_i pa faktor vpliva. Vrednosti h_i so diagonalni elementi matrike H :

$$H = B \cdot (B^T \cdot P \cdot B)^{-1} \cdot B \cdot P \quad (3-4)$$

Standardizirane izravnane popravke izračunamo po naslednji enačbi:

$$v_{st} = \frac{v_{izr}}{K \cdot s} \quad (3-5)$$

K je konstanta 4,685, s pa je robustna varianca:

$$s = \frac{MAD}{0,6745} \quad (3-6)$$

MAD je mediana absolutnih razlik popravkov in mediane vektorja popravkov.

Končno lahko izračunamo bikvadratne uteži:

$$w_i = \begin{cases} (1 - v_{st}^2)^2 & |v_{st}| < 1 \\ 0 & |v_{st}| \geq 1 \end{cases} \quad (3-7)$$

Opazovanja z visoko vrednostjo standardiziranega izravnane popravka lahko dobijo celo utež 0, kar bi pomenilo, da jih v izravnavi ne upoštevamo. Metodo lahko torej uporabimo tudi za izločanje grobo pogrešenih opazovanj. V primeru opazovanj GPS v oteženih pogojih lahko ta način privede do izločanja številnih opazovanj, ki jih metoda označi kot grobo pogrešena. Glede na zmanjšano število razpoložljivih opazovanj je smiselnost takšnega ravnanja vprašljiva, saj v praksi pogosto pridemo do minimalnega potrebnega števila opazovanj za določitev iskanih količin, kar pa lahko vodi do pogrešenih rezultatov. Utežna funkcija L1-norma se izkaže kot bolj primerna, saj upošteva vse razpoložljive podatke, slabši pa dobijo ustrezno manjšo utež. Utežna funkcija v lastnem postopku za določitev položaja je rahlo modificirana, saj v primeru, če je kakšen popravek enak 0, pride v izračunu do deljenja z nič. Temu se izognemo z dodelitvijo uteži 1000 vsem opazovanjem, ki imajo absolutno vrednost popravka manjšo od 1/1000.

3.3 Postopek določitve položaja z lastnim programskim paketom

V programskem paketu, ki smo ga razvili v okviru raziskav te naloge, lahko položaj določimo na osnovi samo kodnih opazovanj, samo Dopplerjevih opazovanj ali s kombinacijo kodnih in Dopplerjevih opazovanj. Določitev začetnega položaja zaradi značilnosti Dopplerjevih opazovanj, ki smo jih navedli v prejšnjem poglavju, poteka le s kodnimi opazovanji. Bistvena razlika glede na običajne metode je obdelava podatkov nadaljnjih epoh, ki je zelo drugačna od obdelave podatkov začetne epohe.

Program lahko položaje satelitov in popravek urinega stanja satelitovih ur določi iz oddanih ali natančnih efemerid. V obdelavi opazovanj lahko upoštevamo Klobucharjev model ionosfere, Saastamoinenov ali Hopfieldov model zenitne troposferske refrakcije ter različne modele projekcijske komponente troposferske refrakcije. Obdelava opazovanj poteka po metodi najmanjših kvadratov, lahko pa opazovanjem dodelimo uteži z modificirano metodo robustne statistike L1-norma. Dodatno lahko vključimo uteži opazovanj glede na višinski kot in vrednost SNR posameznega signala. V postopek obdelave lahko vključimo tudi izločanje grobih pogreškov z globalnim testom modela oz. tau-testom. Če poznamo začetni položaj, lahko ta podatek upoštevamo za določitev položaja sprejemnika v nadaljnjih epohah. Programski paket vsebuje še druge postopke, za katere smo skozi raziskave ugotovili, da se ne obnesejo oz. so zelo tvegani, npr. filtriranje funkcije urinega stanja sprejemnikove ure ali omejitev spremembe položaja. Neuspešne postopke na kratko opisujemo v 5.3.

3.3.1 Določitev začetnega položaja

Neznanke v matematičnem modelu določitve položaja so koordinate X , Y in Z ter popravek urinega stanja sprejemnikove ure dTr . Vhodni podatek v postopku obdelave so približne vrednosti neznank. Začetna približna vrednost za dTr je enaka 0, začetne vrednosti za koordinate so poljubne, saj pogosto približnih vrednosti koordinat ne poznamo. Ker gre za iterativen postopek, lahko začetni približni položaj tudi zelo odstopa od dejanskega, npr. več 10 km, kar smo tudi sami preverili, pa vseeno dobimo enak rezultat kot če poznamo dober približek dejanskega položaja.

V obdelavi uporabimo vse razpoložljive kodne psevdo razdalje. V prvi iteraciji popravke opazovanj določimo po metodi najmanjših kvadratov. V vsaki od naslednjih iteracij v primeru izračuna z robustnimi metodami utež opazovanja določi modificirana utežna funkcija L1-norma. Če je absolutna vrednost popravka opazovanja manjša od 0,001 m, je utež opazovanja enaka 1000. S tem preprečimo deljenje z nič ter prevelike vrednosti uteži in posledično neuravnoteženo rešitev, če je kateri od popravkov zelo majhen. Kadar je absolutna vrednost popravka večja od 0,001 m, utež opazovanja izračunamo kot obratno absolutno vrednost popravka po enačbi (3-1). Skupna utež opazovanja je enaka produktu uteži L1-norme, uteži višinskega kota in uteži SNR. Če katere od navedenih uteži ne aktiviramo, je njena vrednost enaka 1. Skupna utež opazovanja predstavlja ustrezni diagonalni element matrike uteži P .

Iterativni postopek konvergira, dokler so v vsaki iteraciji absolutne vrednosti popravkov opazovanj manjše kot v predhodni iteraciji. Postopek zaključimo v iteraciji, kjer je sprememba izravnane vrednosti položaja manjša od 0,1 m. Če te vrednosti ne dosežemo do petdesete iteracije, postopek zaključimo v tej iteraciji.

Po zaključenem iterativnem postopku dobimo izravnane vrednosti za začetni položaj (X , Y , Z) in ocenjeno začetno stanje sprejemnikove ure. Oceno natančnosti končne rešitve lahko podamo s standardnim odklonom, ki ga izračunamo po enačbi (2-16).

3.3.2 Določitev položaja v nadaljnjih epohah

Položaj v naslednjih epohah lahko določimo na osnovi kodnih opazovanj, na osnovi Dopplerjevih opazovanj ali s kombinacijo kodnih in Dopplerjevih opazovanj. Določitev položaja poteka relativno glede na začetni položaj, razen v primeru, če izberemo samo kodna opazovanja. Takrat je določitev položaja v vsaki epohi neodvisna od predhodnih epoh. Postopek določitve položaja v primeru samo kodnih opazovanj je za vsako epoho enak postopku določitve položaja začetne epohe.

Začetni položaj privzamemo kot referenčni za nadaljnje epohe, saj gre pri navigaciji oseb za majhne hitrosti, interval zajema pa je pogost, na 1 s ali tudi manj.

Določitev neznank v epohah, ki sledijo začetni, poteka v dveh fazah. V prvi fazi iterativno določimo neznanko popravka sprejemnikove ure dTr . Določitev te neznanke je odvisna od trenutno določenega položaja, zato v prvi epohi ne moremo ločeno obravnavati sprejemnikove ure in koordinat položaja, saj lahko približni začetni položaj zelo odstopa od dejanskega položaja. V nadaljnjih epohah je v fazi določitve dTr trenutni položaj enak tistemu, ki smo ga določili kot končnega v predhodni epohi. Glede na majhno hitrost in kratek čas med epohami je ta položaj zelo blizu dejanskemu položaju in je zato ta princip korekten. Postopek običajno zelo hitro, v nekaj iteracijah, pride do končne rešitve. Skupno utež opazovanj upoštevamo enako kot v začetni epohi. Če izberemo robustni način obdelave, je v prvi iteraciji utež L1-norme enaka 1, nato jo računamo enako kot v prvi epohi.

Kadar v postopek vključimo Dopplerjeva opazovanja, sama ali skupaj s kodnimi opazovanji, za določitev dTr uporabimo le Dopplerjeva opazovanja. Posledica takšnega načina določitve dTr , t.j. ločeno in samo z Dopplerjevimi opazovanji, je precej bolj gladka krivulja izračunanih vrednosti dTr v primerjavi s krivuljo, ki jo dobimo z npr. skupno obravnavo dTr in položaja ter vključitvijo kodnih opazovanj. Obenem zelo zmanjšamo nenadne večje spremembe popravkov dTr .

V drugi fazi obdelave posamezne epohe določimo preostale tri neznanke koordinat položaja. Popravek sprejemnikove ure dTr , ki smo ga izračunali v prvi fazi, je namreč podatek za drugo fazo obdelave. Uteži opazovanj upoštevamo enako kot v prvi epohi in v prvi fazi nadaljnjih epoh. Pogoj za zaključek iteracije prve in druge faze nadaljnjih epoh je enak kot za začetno epoho.

Če v obdelavo vključimo Dopplerjeva opazovanja, le-ta upoštevamo s prirejeno različico enačbe (2-3):

$$DD_i = DD_{i-1} - \frac{Dl_{i-1} + Dl_i}{2} \cdot \lambda_{L1} \cdot dt \quad (3-8)$$

V enačbi (3-8) so: DD_i t.i. Dopplerjeva psevdo razdalja za trenutno epoho, DD_{i-1} Dopplerjeva psevdo razdalja v predhodni epohi, Dl_{i-1} in Dl_i sta merjeni vrednosti

Dopplerjeve frekvence v predhodni in v trenutni epohi. Negativen predznak v enačbi nastopa zato, ker je pri oddaljevanju Dopplerjev efekt negativen, pri bližanju pa pozitiven.

Z enačbo (3-8) upoštevamo srednjo vrednost Dopplerjeve frekvence med zaporednima epohama namesto zgolj v eni ali drugi skrajnosti. Tak način uporablja več avtorjev, npr. Cheng (1999), ki izrazi t.i. »delta range« ΔD kot:

$$\Delta D = \lambda \int_{t_{i-1}}^{t_i} D1(t) dt \approx \frac{1}{2} (D1_{i-1} + D1_i) \cdot \lambda \cdot dt \quad (3-9)$$

Drugi del enačbe lahko koristimo, kadar je časovni interval dt majhen. Cheng (1999) je sicer enačbo uporabil za glajenje kodnih psevdo razdalj z Dopplerjevimi opazovanji, je pa pokazal, da je ta enačba veljavna tudi za časovne intervale več sekund. Časovni interval med sosednjima epohama za vse obravnave primere v nalogi je 1 s.

Programski paket nudi možnost, da namesto opazovanih absolutnih psevdo razdalj uporabimo prave geometrijske razdalje med izravnanim položajem sprejemnika in položajem satelita v predhodni epohi, čemur prištejemo razliko med opazovanimi psevdo razdaljami v trenutni in predhodni epohi oz. srednjo vrednost Dopplerjeve frekvence. Na ta način izničimo vpliv morebitnega večjega odstopanja merjene psevdo razdalje, ki se ponavlja skozi več epoh. Posamezno opazovanje lahko namreč deluje kot grobo pogrešeno, ko pa primerjamo razlike opazovanj med epohami skozi čas, ugotovimo, da ustrezajo modelu bolj kot se zdi na prvi pogled.

V primeru pojava novega satelita pri obdelavi kodnih opazovanj izračunamo pravo razdaljo med določenim položajem sprejemnika in satelitom za predhodno epoho, vrednosti psevdo razdalje za trenutno epoho pa izračunamo na enak način kot za vse ostale satelite, ki so bili prisotni v predhodni epohi. V primeru Dopplerjevih opazovanj ne moremo ravnati enako, saj nimamo podatka o Dopplerjevi frekvenci za predhodno epoho. V tem primeru izračunamo pravo razdaljo po končani obdelavi trenutne epohe, Dopplerjevo psevdo razdaljo pa izračunamo v naslednji epohi.

3.3.3 Določitev položaja s pogojnim DGPS

Dodatna možnost je določitev položaja z metodo DGPS, kot smo opisali v 2.7.3. Osnovni pogoj, ki mora biti izpolnjen za uporabo DGPS, je razpoložljivost podatkov referenčnega sprejemnika. Če imamo na razpolago podatke referenčnega sprejemnika, lahko izvajamo t.i. brezpogojni DGPS, kjer upoštevamo vse signale s skupnih satelitov premičnega in referenčnega sprejemnika. Kot že omenjeno, se takšen način v oteženih pogojih ne obnese. Rezultati DGPS v različnih pogojih so predstavljeni v 4.3.1.

Namesto tega načina lahko uporabimo t.i. pogojni DGPS. DGPS se dobro obnese v neoviranih pogojih, torej za signale, ki niso odbiti ali oslabljeni zaradi prehoda skozi fizično oviro. Tudi v delno oviranih pogojih so določeni signali neoslabljeni in neodbiti. Če je tovrstnih signalov zadosti, lahko trenutni položaj določimo z DGPS, a zgolj s podatki opazovanj močnih signalov. Edino razpoložljivo merilo za moč signala je razmerje moči in šuma signala SNR. Za mejno vrednost močnih in šibkih signalov smo postavili vrednost 35 dBHz, ki je običajno spodnja meja sprejema signalov z običajnimi sprejemniki GPS (glej 2.5.1). Minimalno število skupnih satelitov premičnega in referenčnega sprejemnika za DGPS je štiri, vendar pa vseeno želimo doseči nadštevilnost v matematičnem modelu obdelave. Ker je tudi pet skupnih satelitov še majhno število in lahko, tudi sodeč po lastnih izkušnjah, pride do večjih odstopanj, smo za najmanjše število skupnih satelitov določili število 6. Torej DGPS uporabimo, če ima premični sprejemnik v posameznem trenutku najmanj šest signalov z vrednostjo SNR najmanj 35, obenem pa so ti signali oddani z istih satelitov kot signali, ki jih sprejema referenčni sprejemnik.

DGPS seveda uporabimo ob predpostavki, da so podatki referenčnega sprejemnika na razpolago za vse epohe opazovanj. V praktičnih primerih te naloge smo uporabili podatke permanentne postaje GSR1 in navidezne podatke VRS državnega omrežja permanentnih postaj Signal. Podatke smo pridobili s spletne strani omrežja. Izvajali bi lahko tudi DGPS v resničnem času, če bi programu za obdelavo opazovanj sproti dovajali podatke referenčne postaje preko npr. omrežja GSM.

Če je v programu aktivirana opcija DGPS in so podatki referenčne postaje na razpolago, program izvede izračun položaja z metodo DGPS za vse epohe, kjer je izpolnjen pogoj najmanj 6 skupnih satelitov s signali z vrednostjo SNR 35 ali več. Če pogoj ni izpolnjen, program določi položaj z lastno metodo, opisano v 3.3.2. Osnova je zadnji položaj, določen z DGPS. Če je že začetni položaj merjen v oteženih pogojih in pogoj za DGPS ni izpolnjen, program določi položaj kot v 3.3.1.

Program za vsako epoho preveri pogoje za DGPS. Če pogoji niso izpolnjeni, dela po lastno razviti metodi do konca izmere oz. do naslednje epohe, kjer je izpolnjen pogoj za DGPS. Takrat položaj ponovno določi na osnovi DGPS. Določitev položaja z DGPS je namreč absolutna in je neodvisna od predhodnih epoh, medtem ko je lastna razvita metoda relativna in izhaja iz zadnjega avtonomno oz. DGPS določenega položaja.

V primeru, kadar je možno izvesti DGPS med izmero ali na koncu izmere, imamo možnost izračuna popravkov položajev. V trenutku, ko je ponovno možen DGPS, lahko položaj izračunamo z DGPS in lastno metodo. Odstopanje v položaju časovno sorazmerno porazdelimo na vse položaje, določene v predhodnih epohah, ko pogojni DGPS ni bil možen. Tovrstni popravljene položaji za navigacijo v resničnem času nimajo konkretnega pomena, jih pa lahko npr. uporabimo za analizo kakovosti položajev premičnega sprejemnika.

V postopku obdelave z DGPS uporabimo, podobno kot pri avtonomni določitvi položaja, uteži robustne metode L1-norma, ki zmanjšajo vpliv manj kakovostnih opazovanj. Pri obdelavi praktičnih primerov se je včasih pripetilo, da je »DGPS-položaj«, kljub temu, da so bili izpolnjeni pogoji za DGPS, iz neznanih razlogov odstopal od prejšnjega položaja za več kot 10 m, dejanska sprememba položaja pa je bila okvirno 1 m. V postopku obdelave je dodana možnost, da v takem primeru položaj izračunamo z lastno razvito metodo. Točnost tako določenega položaja je veliko boljša.

4 TESTIRANJE POSTOPKOV OBDELAVE PODATKOV IN OPREME HS GPS

V okviru raziskav smo metode obdelave testirali v različnih pogojih in z različnimi instrumenti. Preverili in analizirali smo različne metode, modele in uteži z namenom ugotoviti, katere je sploh smiselno uporabiti za izboljšanje kakovosti rezultatov. Na različnih kombinacijah tipov opazovanj smo preizkusili različne kombinacije obstoječih metod, modelov, uteži in lastno razvitih postopkov. Poglavje vključuje opise in rezultate najbolj nazornih primerov. Dejansko smo izvedli veliko več preizkusov, ki pa vsi kažejo podobne lastnosti in značilnosti kot predstavljeni primeri.

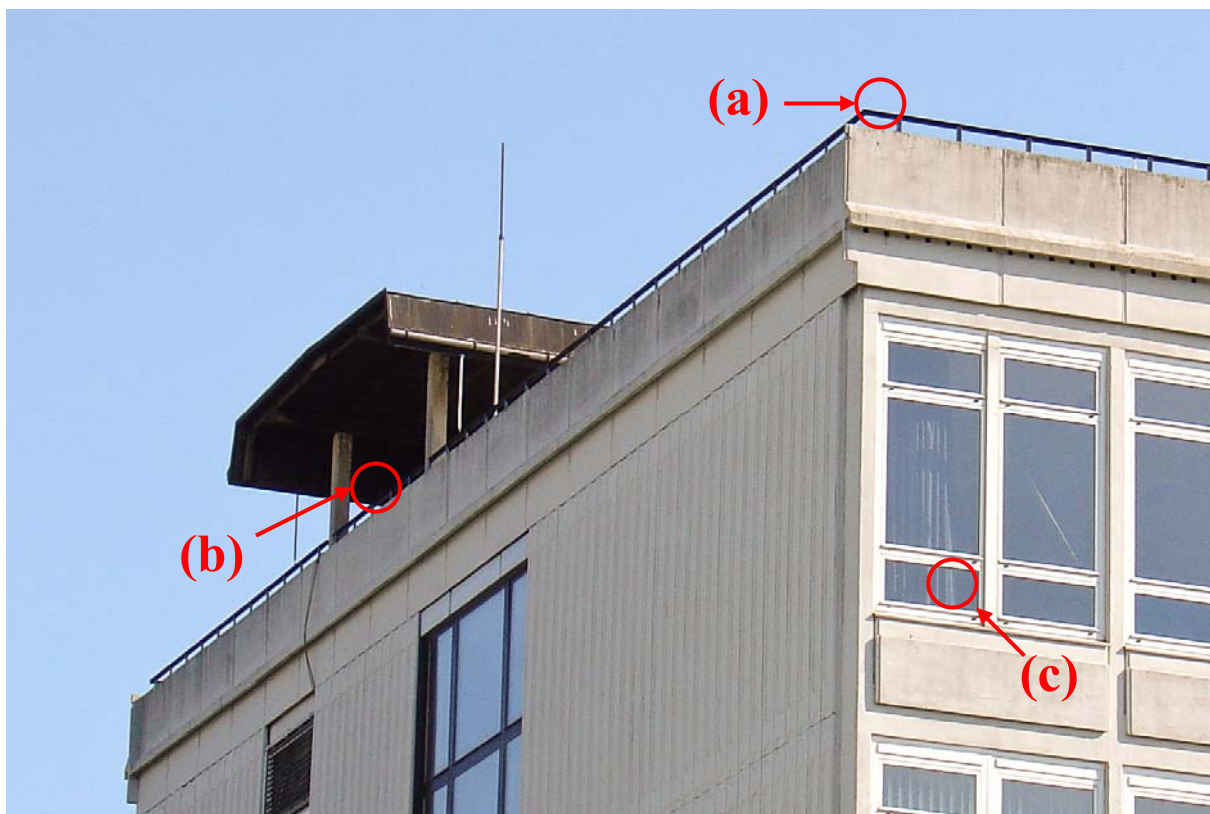
4.1 Testiranja v različnih pogojih

Za pridobitev popolne slike o metodah obdelave in zmožnosti opreme HS GPS smo testiranja izvajali v različnih pogojih. Večino testov smo izvedli v in na stavbi UL FGG v Ljubljani v naslednjih pogojih:

- (a) Neoviran sprejem signalov s satelitov. Sprejemnik smo postavili na vrh stebra na strehi stavbe. Položaj izmeritvene točke je na slikah 4-1 in 4-2 označen s simbolom (a).
- (b) Oviran sprejem signalov s satelitov izven stavbe. Sprejemnik stoji na jekleni ograji pod nadstrešnico, ki ima leseno-kovinsko konstrukcijo. Položaj točke je na slikah 4-1 in 4-2 označen s simbolom (b). V takšnem okolju je število signalov še vedno visoko, je pa večina signalov oslabljenih ali odbitih.
- (c) Znotraj objekta. Anteno sprejemnika smo postavili na vrh katedra v predavalnici, ki je oddaljen pribl. 1 m od okna, ki je v smeri SZ od kadetra, in približno 2 m od zunanje armirane betonske stene, ki je SV od katedra. Okvirni položaj točke je na sliki 4-1 označen s simbolom (c). Situacija izmere znotraj objekta je prikazana na sliki 4-2 na desni strani zgoraj. Značilno za takšna okolja je zmanjšano število sprejetih signalov, visoka stopnja oslabitve signalov in velika prisotnost pogreška večpotja.
- (d) Mešani pogoji – kinematična izmera. Trajektorija gibanja je prikazana na sliki 4-2. Izmera pričnemo na enem od stebrov (S2 oz. S3), nadaljujemo vzdolž črtkane linije do

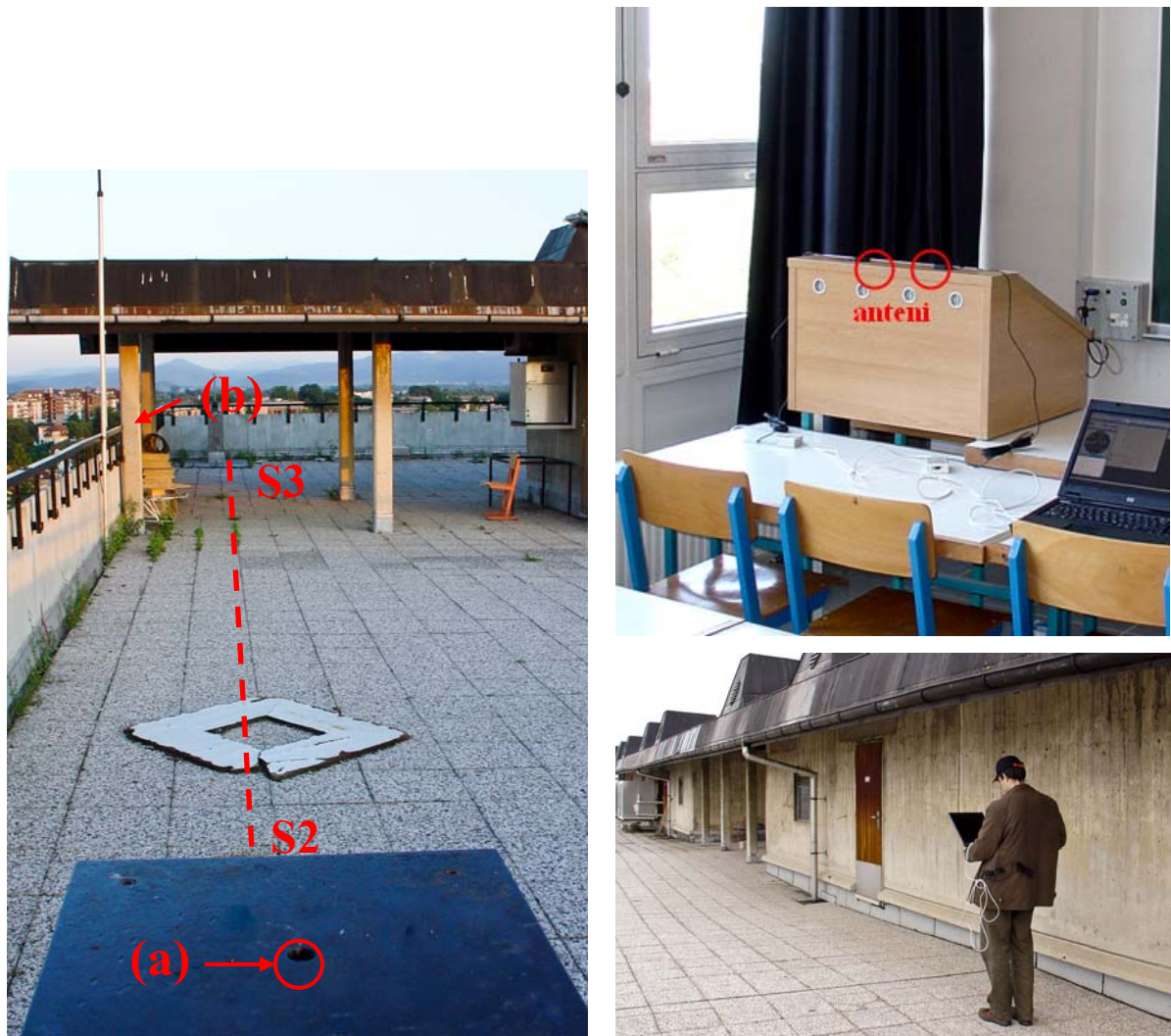
središčnega mesta pod nadstrešnico, kjer stojimo okvirno 30 sekund, nato izmero zaključimo na drugem stebu. Celotna posamična izmera traja 60 sekund.

- (e) Neovirani in mešani pogoji – kinematična izmera. Testno izmero enkrat izvajamo po navidezni zveznici med stebroma S3 in S4, ki je na sliki 4-3 označena z (e'), drugič pa od začetnega stebra pravokotno do nadstrešnice, kjer pot nadaljujemo neposredno pod kapjo nadstrešnice, potem pa končamo pravokotno do ciljnega stebra, kot je na sliki 4-3 označeno z (e). V obeh primerih traja izmera 60 sekund.
- (f) Oteženi pogoji – kinematična izmera. Izmero pričnemo na točki pod kapjo nadstrešnice, prečimo na drugo stran, kjer nato nadaljujemo pod kapjo do prehoda, kjer gremo ponovno na drugo stran in pod kapjo zaključimo zanko. Izmera vključuje dva obhoda v času 120 sekund. Približna pot gibanja je na sliki 4-3 označena z (f).



Slika 4-1: Osnovne izmeritvene točke

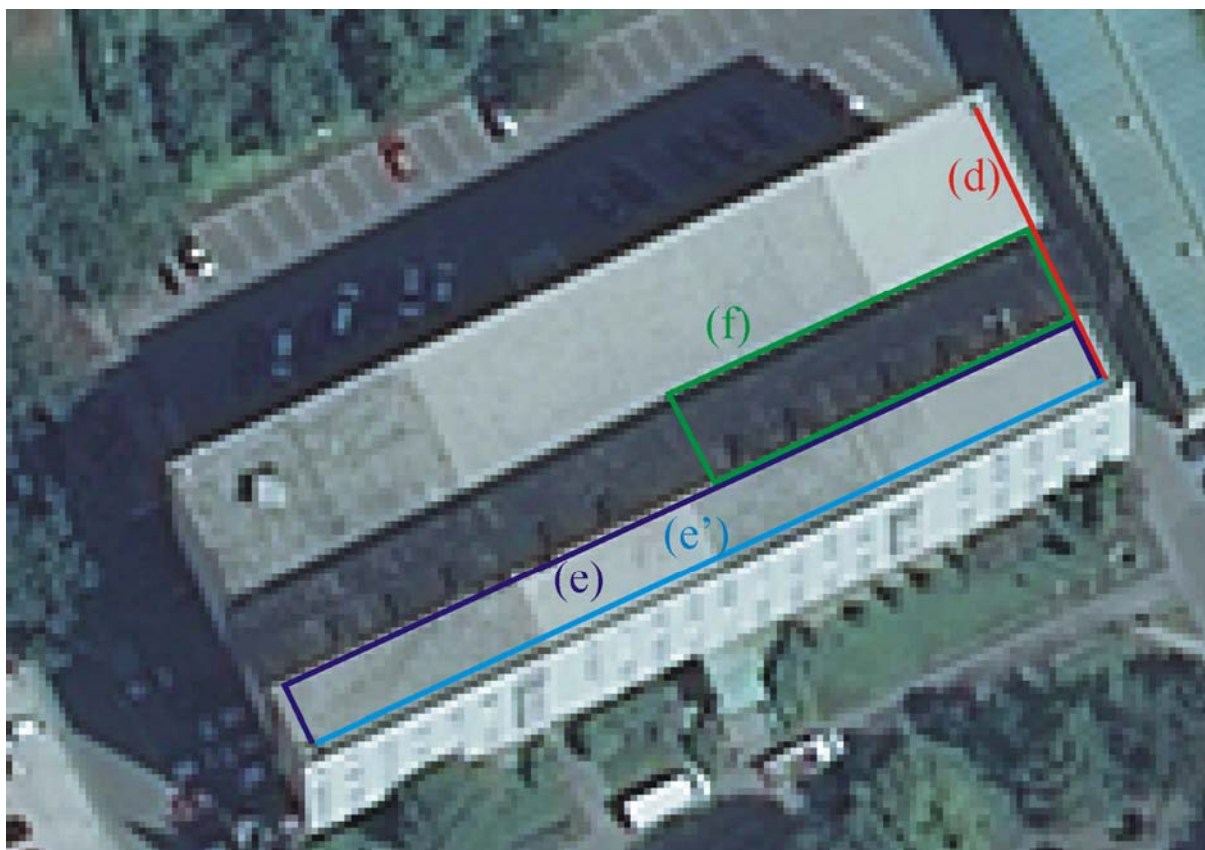
Fig 4-1: Basic measurement points



Slika 4-2: Izmeritvene točke na strehi stavbe in znotraj objekta, izvedba izmere
Fig 4-2: Measurement points on the rooftop and inside of the building, performing a survey

Način izvedbe kinematične izmere je prikazan na sliki 4-2 desno spodaj. Anteni obeh sprejemnikov smo pritrčili na notranjo stran kape in s kablom povezali s sprejemnikoma. Sprejemnika smo preko kabla USB povezali s prenosnim računalnikom, kamor smo shranjevali podatke meritev.

Trajektorije kinematičnih izmer so prikazane na sliki 4-3, kjer je podlaga izrez posnetka ortofoto. Temnejši del na strehi ponazarja nadstrešnico. Kinematične izmere smo izvajali v različnih dnevih in ob različnih časih.



Slika 4-3: Shema kinematičnih izmer na posnetku ortofoto

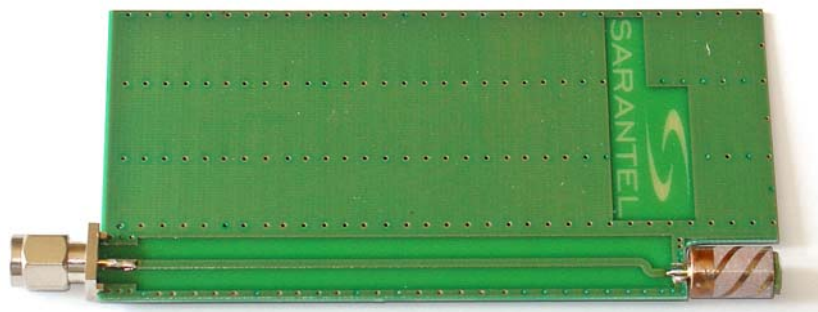
Fig 4-3: Kinematic survey outlines on orthophoto image

4.2 Oprema HS GPS v preizkusih

Modele sprejemnikov HS GPS na trgu smo predstavili v 2.5.3. Različnih čipov na trgu ni veliko, še manjša je izbira instrumentov, ki omogočajo posredovanje podatkov opazovanj. Če želimo pridobiti surove podatke opazovanj, smo žal omejeni na enega proizvajalca čipov. Švicarsko podjetje u-blox ponuja izdelke HS GPS v različnih izvedbah. Za namene preizkušanja je najbolj primeren t.i. »evaluation and development kit«. Preizkusni set ponujajo v dveh različicah: AEK-4T vsebuje čip starejše generacije Antaris, EVK-5T pa vsebuje novejši čip u-blox 5. Ponujajo tudi druge, cenejše različice preizkusnih setov, a ti ne omogočajo posredovanja podatkov opazovanj. Opis izdelkov je na spletni strani proizvajalca, izdelke pa lahko naročimo preko njihove lastne spletne trgovine.

Osnovni del preizkusnega seta je ohišje sprejemnika, ki vsebuje čip GPS in potrebno elektronsko vezje. Velikost ohišja AEK-4T je 5,4 x 5,5 x 2,4 cm, medtem ko je velikost ohišja EVK-5T 7,4 x 5,5 x 2,4 cm. Ohišji obeh instrumentov imata na eni strani antenski priključek tipa SMA in priključek USB. Ohišje EVK-5T ima dodatno na drugi strani še standardni serijski priključek RS-232. Instrumenta nimata akumulatorja. Napajanje zagotovimo preko kabla USB ali serijskega kabla. Instrumenta tudi nimata lastnega pomnilnika. Oba delujeta samo v načinu posredovanja podatkov drugi napravi preko vhoda USB ali serijskega vhoda. Obdelane podatke opazovanj instrument posreduje v obliki standardnih stavkov NMEA, podatke surovih opazovanj pa v lastni obliki RXM-RAW. Opis obeh načinov je v 2.5.4.

Proizvajalec k setu prilaga t.i. »patch« anteno z oznako ANN-MS. Slika 2-2 prikazuje preizkusni set EVK-5T. V raziskave smo vključili tudi drug tip anten, t.i. »geohelix«. Dejansko velikost te antene lahko vidimo na desni strani slike 2-3. Priključek antene Sarantel GeoHelix SL1300 na priključek SMA smo opravili preko povezovalne plošče (orig. Evaluation board). Slika 4-4 prikazuje videz plošče z anteno in antenskim priključkom.



Slika 4-4: Antena "geohelix" na povezovalni plošči

Fig 4-4: Geohelix antenna on evaluation board

Navedeni instrumenti omogočajo navigacijo GPS v resničnem času preko obdelanih meritev ali z obdelavo surovih opazovanj v drugi napravi. Obdelane podatke ali surove podatke opazovanj lahko sproti beležimo v datoteke, ki jih nato uporabimo za naknadno obdelavo. Za namene raziskovanja in testiranja smo vsa opazovanja beležili v besedilne datoteke. Instrumenti so sposobni hkrati posredovati podatke v ASCII obliki v stavkih NMEA in surova opazovanja v binarni obliki. Shranjena surova opazovanja smo preko lastnih modulov

pretvorili v standardni zapis podatkov opazovanj RINEX. Oddane efemeride lahko beležimo neposredno iz instrumenta, kjer so zapisani v binarni obliki, za naknadno obdelavo opazovanj pa lahko koristimo efemeride, zapisane v datotekah v obliki RINEX.

4.3 Preizkus metod, modelov, uteži in nastavitvev obdelave opazovanj

V nadaljevanju prikazujemo grafične analize različnih modelov, uteži in nastavitvev obdelave surovih opazovanj z instrumenti HS GPS. Grafična analiza temelji na primerjavi izračunanih koordinat z danimi koordinatami. Dane položaje izmeritvenih točk smo določili z natančnimi geodetskimi instrumenti in postopki. Položaje točk na odprtem območju, npr. (a), smo določili z geodetskimi sprejemniki GNSS in fazno diferencialno metodo določitve položaja. Točnost danega položaja je nekaj cm. Te točke so hkrati osnova za določitev položajev ostalih izmeritvenih točk. Položaje točk v oteženih pogojih za opazovanja GNSS, npr. (b), smo izračunali z ločnimi preseki z referenčnih točk. Razdalje med točkami smo izmerili z elektrooptičnim razdaljemerom. Točnost koordinat teh točk je boljša kot 10 cm. Položaj točke v notranjosti stavbe (c) smo določili z geodetskim poligonom z začetkom na referenčnih točkah. Točnost položaja je okvirno 20 cm.

Položaje vseh točk smo sicer izmerili oz. izračunali v pravokotnih oz. elipsoidnih koordinatah na referenčnem elipsoidu GRS 80, za lažjo primerjavo pa smo jih pretvorili v ravninski koordinatni sistem s prečno Merkatorjevo projekcijo. Ravninske koordinate so tako izražene v državnem koordinatnem sistemu Republike Slovenije z oznako D96/TM. Koordinatni osi označujemo z N, ki predstavlja projekcijo srednjega meridiana in je usmerjena proti severu, in z E, ki je projekcija ekvatorja in usmerjena proti vzhodu. Višinska komponenta v prikazih je elipsoidna višina h , ki je direktno merjena količina. Za izračun nadmorske višine H moramo določiti geoidno višino iz absolutnega modela geoida, tega pa v to nalogo nismo vključili. Bistvo pričujočih raziskav je namreč primerjava koordinat, ki jih pridobimo na različne načine, ne pa absolutne vrednosti koordinat. Koordinate točk izražamo v ravninskem koordinatnem sistemu zaradi lažje predstavljalivosti ter primerjave kakovosti horizontalnih komponent in višinske komponente položaja.

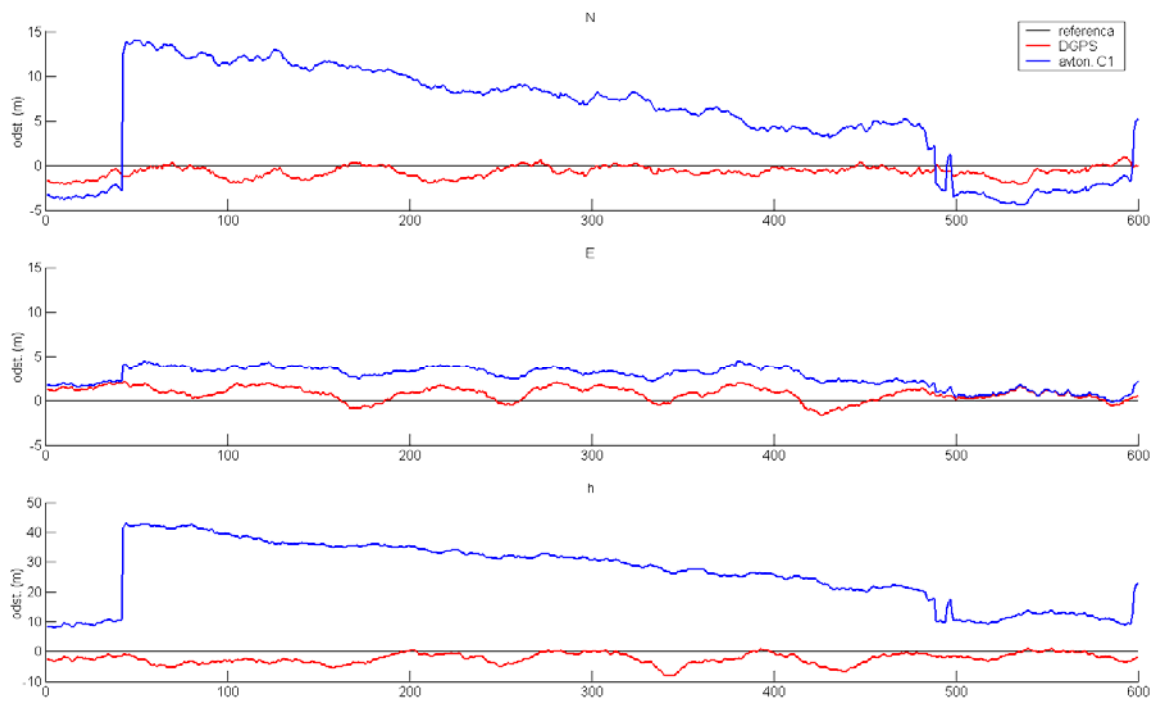
Na grafičnih prikazih statičnih izmer v nadaljevanju vodoravne osi predstavljajo časovne trenutke (epohe) v sekundah, vertikalne osi po komponentah pa odstopanja od danega položaja v metrih. Črna vodoravna črta predstavlja referenco, torej pravo vrednost koordinate. Odstopanja koordinat obdelanih opazovanj HS GPS od pravih položajev prikazujemo s črtami v različnih barvah, ki jih pojasnimo v spremnem besedilu in v legendi. Vse meritve smo izvajali z intervalom zajema položajev 1 s.

Oznake tipov opazovanj v testiranju in analizi smo privzeli iz standarda RINEX:

- C1: kodna opazovanja (kodne psevdo razdalje),
- L1: fazna opazovanja,
- D1: Dopplerjeva opazovanja,
- S1: SNR (razmerje moči in šuma signala).

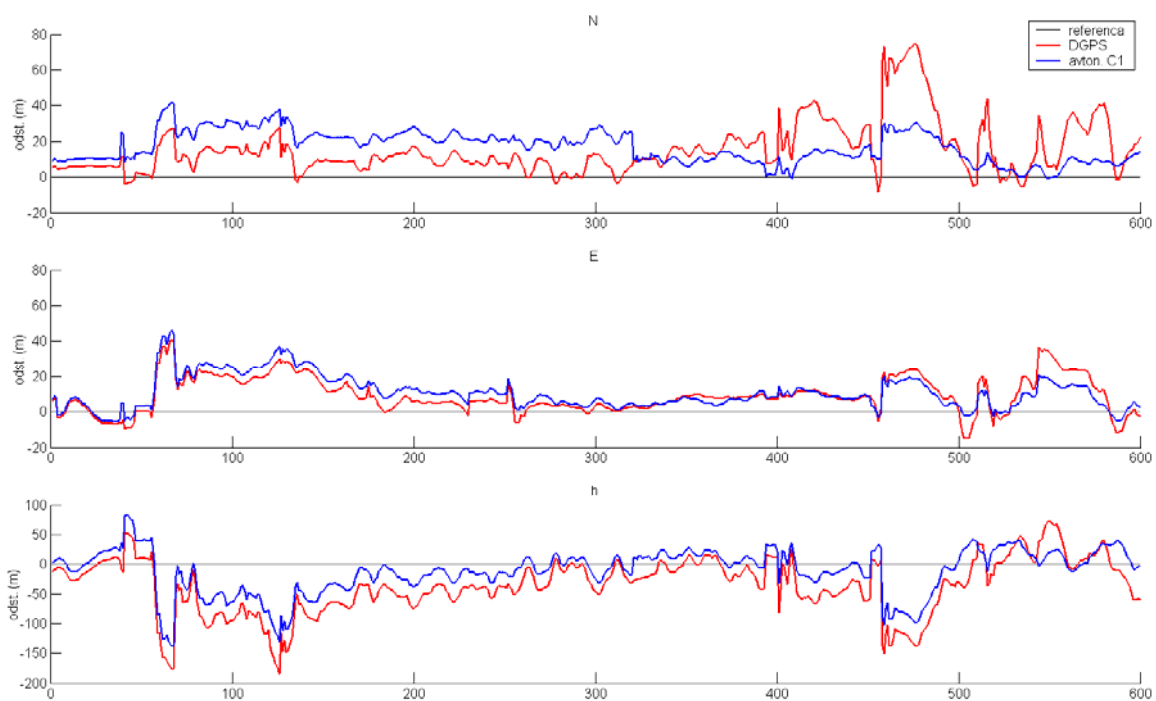
4.3.1 Brezpogojni DGPS v oteženih pogojih

Brezpogojni DGPS v določitvi položaja z diferencialno metodo upošteva vsa opazovanja s skupnih satelitov referenčnega in premičnega sprejemnika. V tem razdelku prikazujemo rezultate brezpogojnega DGPS v različnih pogojih. Slika 4-5 prikazuje primerjavo položajev, ki smo jih določili z DGPS in so označeni z rdečo barvo, in položajev, ki smo pridobili z avtonomno obdelavo kodnih opazovanj C1 in so označeni z modro barvo, v neoviranih pogojih za sprejem signalov s satelitov v okolju (a). V obeh načinih določitve položaja nismo upoštevali modelov atmosfere in uteži. Jasno vidimo izboljšavo rezultatov z DGPS. Točnost položajev DGPS je znotraj par metrov za horizontalne komponente in malo več za višinsko komponento, kar je značilno za to metodo. Velika nenadna sprememba avtonomno določenega položaja je posledica pojava novega opazovanja, kar je v tem primeru povzročilo večji pogrešek pri določitvi urinega stanja sprejemnikove ure in posledično tudi v položaju točke.



Slika 4-5: DGPS v neoviranih pogojih

Fig 4-5: DGPS in normal conditions

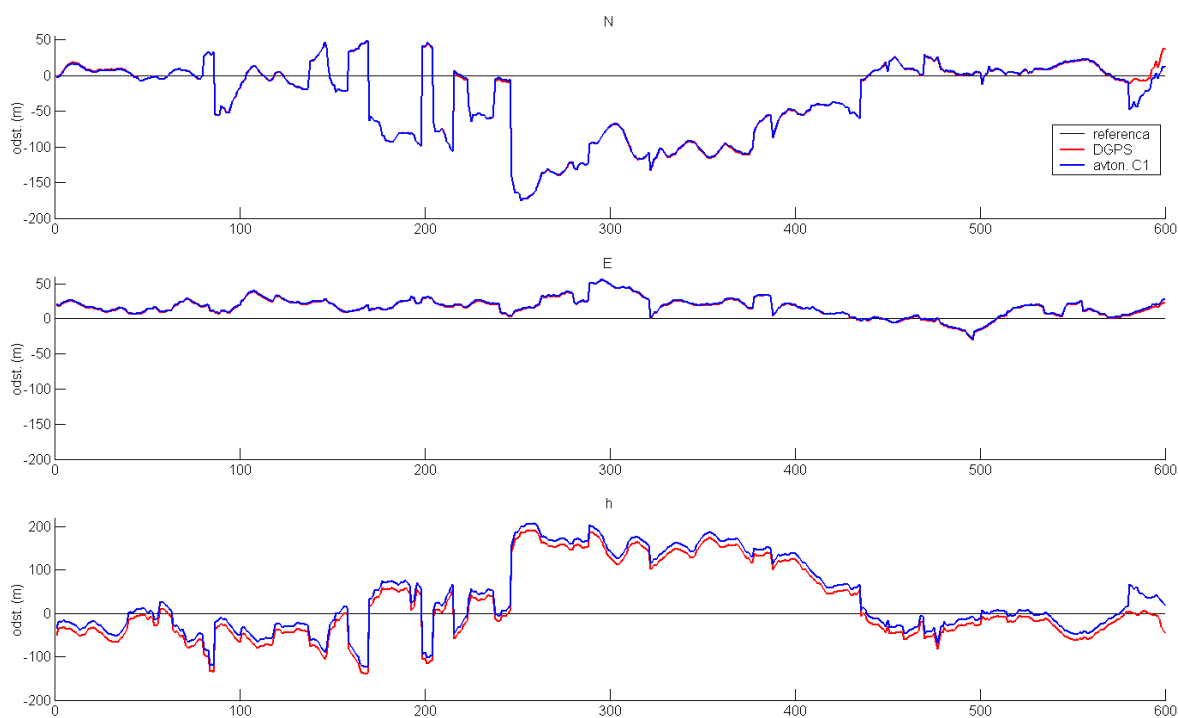


Slika 4-6: DGPS v oteženih pogojih

Fig 4-6: DGPS in challenging environments

Slika 4-6 prikazuje primerjavo položajev DGPS in avtonomno določenih položajev v oteženih pogojih za sprejem signalov na točki (b). Položaji DGPS so prikazani z rdečo barvo, avtonomni položaji z modro. Vidimo lahko velika odstopanja položajev obeh metod. DGPS v večini epoh sicer daje nekoliko boljše rezultate, v določenih pa celo slabše. Odstopanja v višinski komponenti znašajo skoraj 200 m, tudi v načinu DGPS, kar je seveda zelo daleč od običajne točnosti te metode. Torej DGPS že v delno oteženih pogojih ne opravlja svoje običajne naloge.

Zanimiva je situacija na primeru opazovanj znotraj objekta. Slika 4-7 prikazuje primerjavo DGPS in kodne avtonomne določitve v okolju (c). Oba načina določitve položaja dajeta podobne rezultate, razlike v koordinatah N in E so v večini epoh okoli 5 m, razlike v višini pa okoli 20 m.

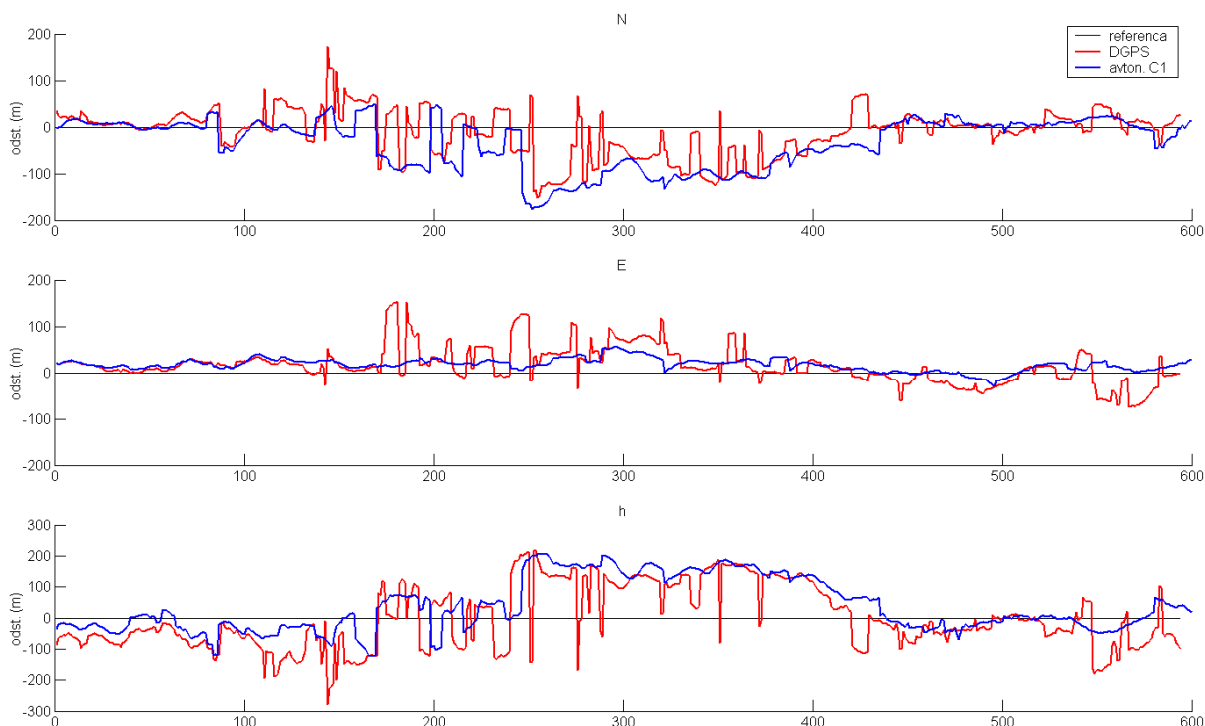


Slika 4-7: DGPS znotraj objekta

Fig 4-7: DGPS indoors

Zgornji primeri potrjujejo hipotezo, da brezpogojni DGPS dejansko izboljša rezultate samo za opazovanja, ki jih izvajamo v neoviranih pogojih za sprejem signalov s satelitov, saj praviloma tudi referenčni sprejemnik za DGPS izvaja opazovanja v takšnih pogojih.

DGPS se obnese še slabše, če je tudi referenčni sprejemnik v oteženih pogojih. Na sliki 4-8 je primerjava DGPS in kodne avtonomne določitve položaja, kjer sta bila referenčni in premični sprejemnik v načinu DGPS med seboj oddaljena pribl. 30 cm, torej v skoraj identičnih pogojih. Po rezultatih sodeč pa DGPS zelo pokvari že tako slabe rezultate.



Slika 4-8: Celotni DGPS znotraj objekta

Fig 4-8: Full indoor DGPS

Sprejemnik, ki smo ga uporabili za določitev položaja točke in je imel v načinu DGPS vlogo premičnega sprejemnika, je bil AEK-4T. Referenčni sprejemnik v zadnjem prikazanem primeru je bil EVK-5T, pri ostalih pa permanentna postaja GSR1 omrežja Signal. Oddaljenost permanentne postaje od izmeritvenih točk je pribl. 3,7 km.

4.3.2 Vpliv ionosfere na opazovanja GPS

Modeliranje ionosferske refrakcije smo opisali v 2.7.4. Za določitev položaja v resničnem času lahko praktično realiziramo le Klobucharjev model ionosfere. Velikost vpliva ionosfere po Klobucharjevem modelu je odvisna od položaja sprejemnika, višinskega kota satelita,

dnevnega časa ter parametrov α in β , ki sta vsak podana v obliki polinoma s štirimi koeficienti in zapisana v navigacijskem sporočilu.

Primer izračunanih vrednosti vpliva ionosfere po Klobucharju velja za dan 16. 07. 2009. Parametri ionosfere imajo naslednje vrednosti:

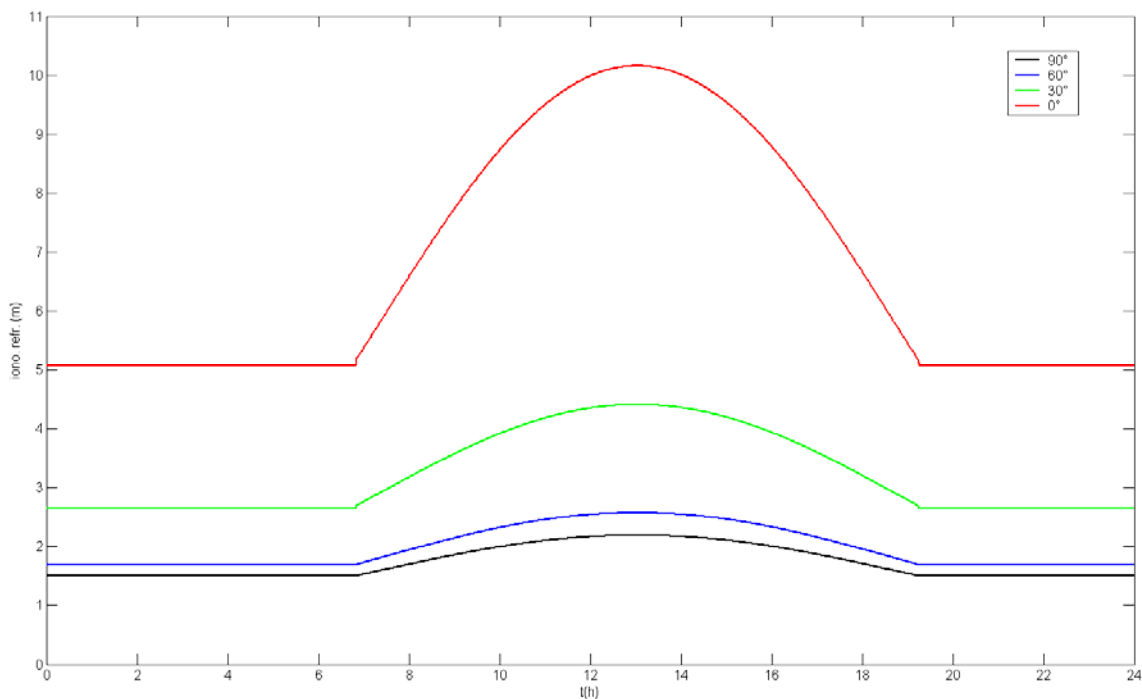
$$\alpha = [4,6566 \cdot 10^{-9} \quad 1,4901 \cdot 10^{-8} \quad -5,9605 \cdot 10^{-8} \quad -1,1921 \cdot 10^{-7}]$$

$$\beta = [79872 \quad 81920 \quad -65536 \quad -458750]$$

Izbran položaj sprejemnika je ($\varphi = 46^\circ$, $\lambda = 14,5^\circ$).

Slika 4-9 prikazuje izračunane vrednosti ionosferske refrakcije glede na dnevni čas in višinski kot satelita. Časovna skala je prikazana v času GPS. Največja ionosferska aktivnost za ta položaj je okoli 13. ure po času GPS, kar pomeni 14. uro po lokalnem času. Vpliv ionosfere je konstanten do 7. ure in po 19. uri po času GPS.

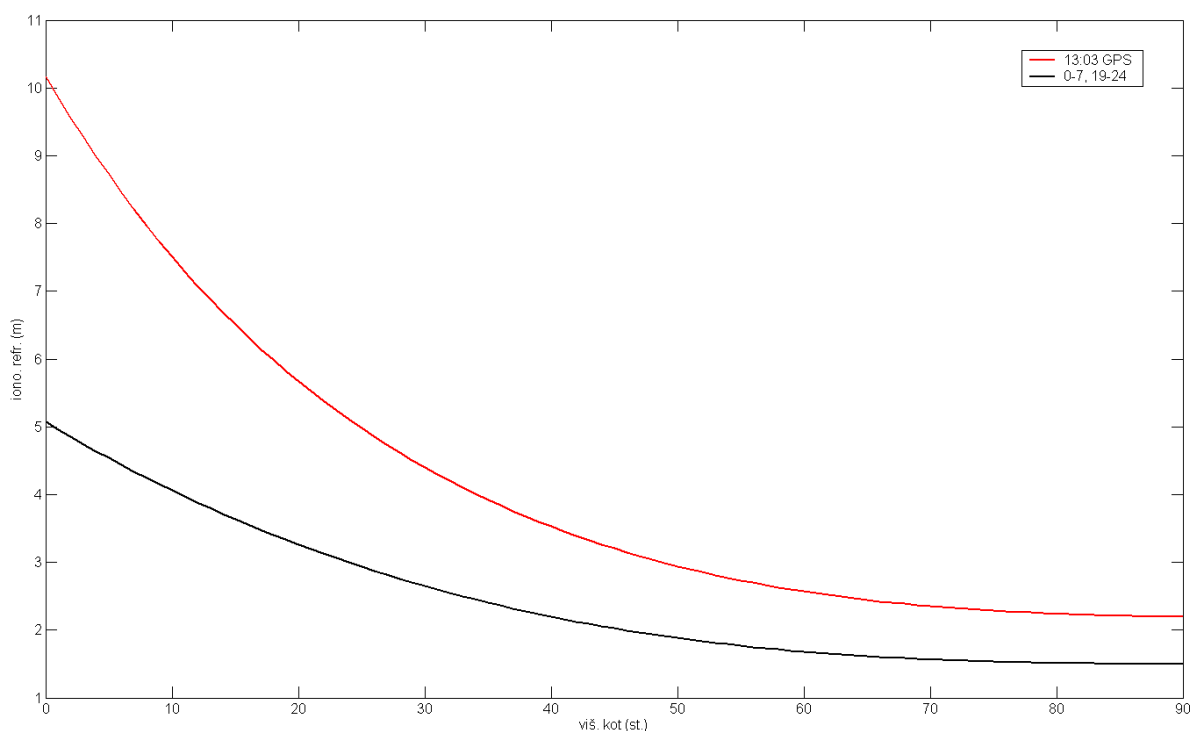
Opazimo lahko tudi precej večji razpon vpliva ionosfere na signale z nizkim višinskim kotom, npr. za kot 0° segajo vrednosti med pribl. 5,1 in 10,2 m, medtem ko je razpon za vrednosti v zenitu oz. višinski kot 90° med 1,5 in 2,2 m.



Slika 4-9: Vpliv ionosfere glede na čas v dnevu

Fig 4-9: Ionosphere effect by the time of day

Slika 4-10 prikazuje velikost ionosferske refrakcije glede na višinski kot v dveh skrajnih dnevnih časih. Rdeča črta prikazuje vrednosti popravka modela ionosfere v trenutku najvišjega vpliva, ki je za ta položaj ob 13:03 po času GPS. Črna črta prikazuje vrednosti popravka za časovna obdobja, ko je vpliv konstanten in hkrati najmanjši, okvirno med 19. in 7. uro.



Slika 4-10: Vpliv ionosfere glede na višinski kot

Fig 4-10: Ionosphere effect by elevation angle

Prikazane vrednosti popravka modela ionosfere se nanašajo na kodna opazovanja. Popravki za fazna in Dopplerjeva opazovanja imajo enake absolutne vrednosti, le predznak je negativen.

4.3.3 Vpliv troposfere na opazovanja GPS

Modeliranje troposferske refrakcije smo opisali v 2.7.5. Vpliv troposfere modeliramo v dveh korakih, najprej z osnovnim modelom, kjer računamo vrednost troposferske refrakcije v smeri

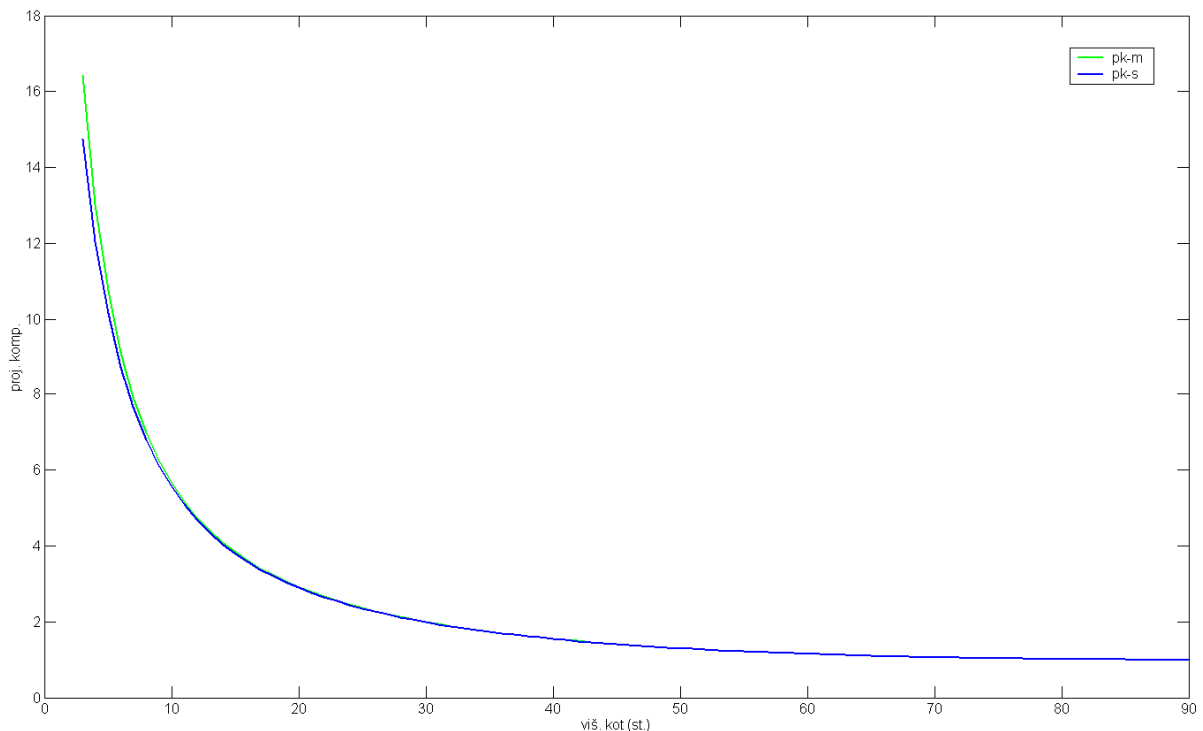
zenita, nato pa z izračunom projekcijske komponente, ki zenitno refrakcijo projicira na smer proti satelitu. V modelu troposfere določamo mokro in suho komponento refrakcije.

Osnovna modela zenitne refrakcije sta Hopfield in Saastamoinen. Pri obeh sta ocenjeni vrednosti mokre in suhe komponente odvisni od meteoroloških parametrov, položaja točke in parametrov referenčnega elipsoida. Meteorološke parametre, to so temperatura, vlažnost in tlak, redkokdaj merimo obenem z opazovanji GPS, zato v modelih največkrat upoštevamo standardne atmosferske parametre.

Za točko s pravokotnimi koordinatami ($X = 4293726,3$ m, $Y = 1110054,8$ m, $Z = 4569061,7$ m) in referenčni elipsoid GRS 80 dobimo naslednje vrednosti zenitne refrakcije:

Suha komponenta: 2,295 m (Hopfield), 2,211 m (Saastamoinen)

Mokra komponenta: 0,082 m (Hopfield), 0,072 m (Saastamoinen)

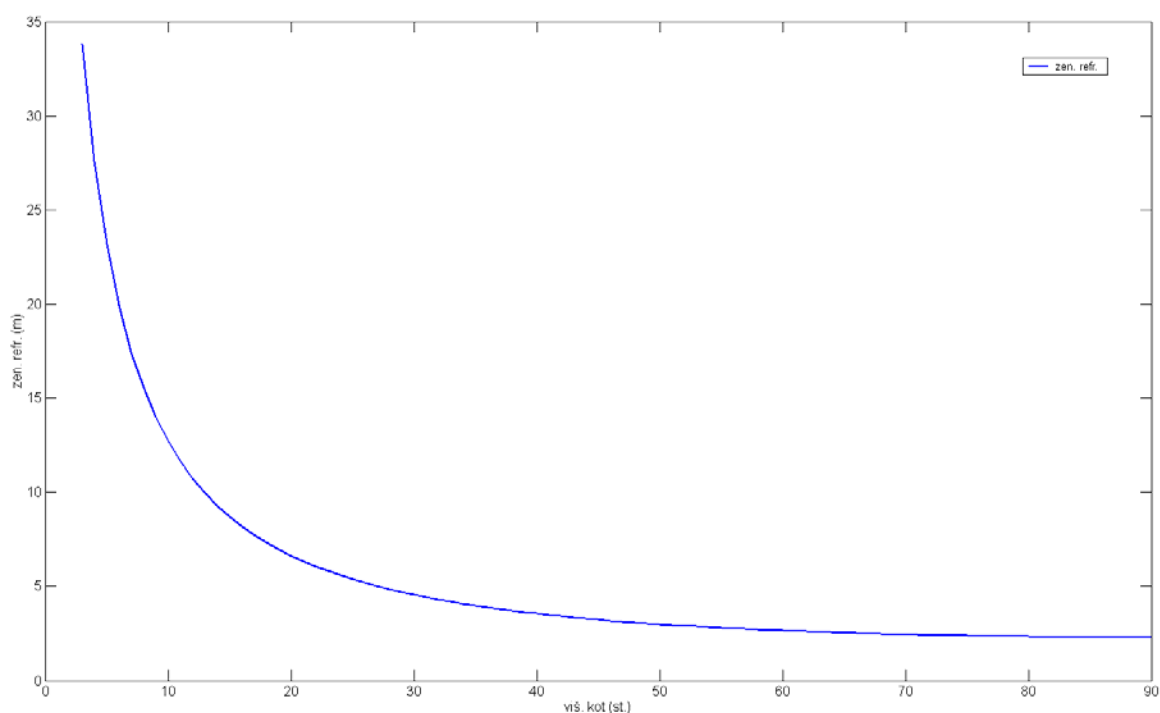


Slika 4-11: Niell-ov model troposferske projekcijske komponente

Fig 4-11: Niell troposphere mapping function

Modeli za izračun projekcijske komponente glede na višinski kot satelita izračunajo faktorja za mokro in suho komponento zenitne refrakcije. Faktorja v zenitu sta enaka 1, proti horizontu pa rasteta v neskončnost. V Niell-ovem modelu je izračun faktorjev poleg položaja in parametrov elipsoida odvisen tudi od dneva v letu in višinskega kota satelita. Za dan 16. 07. 2009, ki je 197. dan v letu, dobimo vrednosti faktorjev, kot jih prikazuje slika 4-11. Faktorji mokre komponente so označeni z zeleno barvo, faktorji suhe komponente pa z modro barvo. Slika prikazuje vrednosti za višinske kote med 3° in 90° , kjer so vrednosti enake 1. Vrednost za kot 0° je neskončna.

Slika 4-12 prikazuje rezultat modela troposfere, če združimo Saastamoinenov in Niellov model, kar je tudi ena od možnosti v programskem paketu Bernese GPS Software (Dach in sod., 2007). Ocenjena vrednost troposferske refrakcije za višinski kot 3° je 33,8 m, za 90° pa 2,3 m.



Slika 4-12: Model troposfere Saastamoinen-Niell

Fig 4-12: Saastamoinen-Niell troposphere model

Poznamo več različnih modelov za izračun zenitne refrakcije in projekcijske komponente, a sodeč po Xu (2007) so razlike med modeli zelo majhne za višinske kote nad 15° .

4.3.4 Metoda najmanjših kvadratov, robustne statistike in izločanje grobih pogreškov

Metodo najmanjših kvadratov v obdelavi opazovanj GPS smo predstavili v 2.7.2. Rešitev matematičnega modela dobimo z rešitvijo enačb od (2-8) do (2-16).

V matematični model lahko vključimo dodatne uteži. Metoda najmanjših kvadratov je namreč primerna predvsem za obdelavo opazovanj, ki so obremenjena zgolj s slučajnimi pogreški. V oteženih pogojih je prisotnost nemodeliranih sistematičnih in grobih pogreškov povsem običajna, zato so za obdelavo tovrstnih opazovanj bolj primerne robustne metode obdelave, kot ugotavlja več avtorjev, ki jih navajamo v 3.2. Opazovanjem lahko dodelimo uteži, ki jih izračunamo z različnimi utežnimi funkcijami metod robustne statistike, npr. L1-norma z enačbo (3-1) ali bikvadratna metoda, ki vsebuje enačbe od (3-3) do (3-7).

Obdelava opazovanj po metodi najmanjših kvadratov ali z metodami robustne statistike se v obeh primerih vrši z iterativnim postopkom izravnave, ki ga prikazujemo z enačbami (2-8) do (2-15). Razlika med obema metodama je dodatna utež, ki jo izračuna utežna funkcija robustne statistike. Določene robustne statistike, kot je npr. bikvadratna metoda, opazovanjem, ki jih ocenijo kot grobo pogrešene, dodelijo utež 0.

Rezultate obdelave obravnavane epohe opazovanj smo pridobili na osnovi kodnih psevdo razdalj brez upoštevanja modelov atmosfere ter uteži višinskega kota in uteži SNR. Položaje v tem razdelku prikazujemo v pravokotnih prostorskih koordinatah. Enote pri vseh vrednostih so metri.

4.3.4.1 Primerjava različnih načinov obdelave na primeru opazovanj znotraj objekta

V obravnavani epohi so opazovanja s 6 satelitov, vrednosti SNR znašajo od 22 do 32.

Referenčne koordinate točke:

X=4293723,6 Y=1110054,1 Z=4569058,8

Metoda najmanjših kvadratov:

X=4293725,1 Y=1110053,7 Z=4569063,9

Robustna obdelava (L1-norma):

$$X=4293723,6 \quad Y=1110052,2 \quad Z=4569061,5$$

Robustna obdelava (bikvadratna metoda):

$$X=4293703,1 \quad Y=1110053,0 \quad Z=4569064,7$$

Prvi dve metodi ne kažeta večjih odstopanj od pravega rezultata, medtem ko robustna bikvadratna metoda povzroči veliko odstopanje predvsem v komponenti X. Metoda namreč eno od opazovanj označi kot grobo pogrešeno. Gre sicer za opazovanje, ki ima drugo najvišjo vrednost SNR, 31. Predpostavljamo lahko, da je v tem primeru kritična vrednost MAD, ki se pojavi v enačbi (3-6). Le-ta temelji na mediani vektorja popravkov, ki lahko pri malem številu opazovanj igra (pre)veliko vlogo.

Če MAD namesto mediane računamo s srednjo vrednostjo vektorja popravkov in absolutnih razlik popravkov in srednje vrednosti, dobimo naslednji rezultat:

$$X=4293724,4 \quad Y=1110053,7 \quad Z=4569063,6$$

Slednji rezultat je veliko bližje pravi vrednosti, sam postopek pa ne izloči nobenega opazovanja.

4.3.4.2 Primerjava različnih načinov obdelave na primeru opazovanj v oteženih pogojih

V epohi so podatki opazovanj z 10 satelitov, vrednosti SNR znašajo od 27 do 46.

Referenčne koordinate točke:

$$X=4293734,5 \quad Y=1110065,1 \quad Z=4569051,6$$

Metoda najmanjših kvadratov:

$$X=4293684,4 \quad Y=1110070,5 \quad Z=4569026,0$$

Odstopanje od pravega položaja: 56,5 m

Robustna obdelava (L1-norma):

$$X=4293671,2 \quad Y=1110052,2 \quad Z=4569028,4$$

Odstopanje od pravega položaja: 67,7 m

Robustna obdelava (bikvadratna metoda):

$$X=4293762,2 \quad Y=1110073,8 \quad Z=4569091,0$$

Odstopanje od pravega položaja: 49,0 m

Pri obdelavi z L1-normo izravnava ne pride do končne vrednosti tudi v 50-ih iteracijah – prikazan je rezultat po 50. iteraciji. Bikvadratna metoda izloči 6 opazovanj, ki naj bi bila grobo pogrešena.

Vektor odstopanj v prvi iteraciji je odvisen od približnega začetnega položaja, ki pa je v izbranem primeru pravi položaj točke. Vrednosti v tem vektorju so naslednje:

$$\begin{array}{ccccc} -65,6 & 21,5 & 23,8 & -11,98 & 11,2 \\ 17,4 & -4,9 & 16,7 & -3,4 & -4,8 \end{array}$$

Iz izpisa odstopanj je očitno, da je prvo opazovanje grobo pogrešeno, saj ima veliko odstopanje, ki je približno trikrat večje od naslednjega največjega odstopanja. Opazovanje ima najmanjšo vrednost SNR, 27, naslednja najmanjša vrednost je 32.

Če iz seznama opazovanj izločimo prvo opazovanje, dobimo naslednji rezultat z metodo najmanjših kvadratov:

$$X=4293739,5 \quad Y=1110075,7 \quad Z=4569068,3$$

Odstopanje od pravega položaja: 20,4 m

Ker pravega položaja v praksi največkrat ne poznamo, grobih pogreškov ne moremo določati na osnovi vektorja odstopanj. Vektor popravkov prve iteracije ima naslednje vrednosti:

$$\begin{array}{ccccc} -32,4 & 16,2 & 22,3 & 5,5 & -16,5 \\ 19,5 & -1,7 & 12,5 & -27,1 & 1,8 \end{array}$$

Prvo opazovanje ima sicer največji popravek, a ta ne odstopa toliko od ostalih kot njena vrednost v vektorju odstopanj. Zgolj na podlagi vektorja popravkov ne smemo kar brez pomislekov izločati opazovanja, saj se očitno matematični model že v prvi iteraciji »okuži« z grobim pogreškom. Pravi grobi pogrešek težko odkrijejo tudi običajne statistične metode, ki običajno predpostavijo normalno porazdelitev podatkov, kar pa za opazovanja GPS v oteženih pogojih zagotovo ne velja.

Odkrivanje in izločanje grobih pogreškov je v primeru opazovanj GPS v oteženih pogojih tvegano dejanje, saj za takšna opazovanja težko dobro določimo a-priori referenčno varianco in standardne odklone opazovanj, poleg tega zelo težko trdimo, da so opazovanja normalno porazdeljena. Če skušamo v modelu s pomočjo znanih metod izločiti grobo pogrešena opazovanja, se lahko pripeti, da grobo opazovanje ostane neodkrito, lahko pa se celo zgodi, da izločimo opazovanja, ki niso grobo pogrešena, kot je v zgornjem primeru z bikvadratno robustno obdelavo. Eden od razlogov za težko odkrivanje grobih pogreškov je tudi to, da jih ni možno določati pred prvo iteracijo izravnave, kar pa pomeni, da je lahko že prva rešitev obremenjena z grobim pogreškom. Postopek obdelave opazovanj v pričujoči nalogi temelji na minimizaciji vpliva grobih pogreškov s pomočjo metod robustne statistike.

4.3.4.3 Prikaz dejanske robustnosti metod robustne statistike v primerjavi z metodo najmanjših kvadratov

V nadaljevanju prikazujemo rezultate obdelave z obema načinoma obdelave na primeru dveh zaporednih epoh opazovanj, najprej z dejanskimi opazovanji, nato z namerno pokvarjenim enim od opazovanj v drugi epohi. V obeh epohah imamo opazovanja z 9 satelitov, rezultate prve epohe smo določili s kodnimi psevdo razdaljami, rezultate druge epohe pa s kombinacijo kodnih in Dopplerjevih opazovanj. Oba tipa opazovanj imata enako utež.

Rezultati obdelave obeh epoh z metodo najmanjših kvadratov:

4293728,34	1110070,99	4569060,11
4293728,79	1110072,26	4569062,00

Rezultati obdelave druge epohe, če spremenimo izmerjeno kodno psevdo razdaljo do enega satelita za 10 m:

4293723,96 1110074,31 4569060,17

Odmik od položaja, ki smo ga pridobili z dejanskimi opazovanji: 5,56 m

Rezultati obdelave obeh epoh z robustno metodo:

4293719,76 1110070,10 4569051,15

4293719,73 1110070,04 4569051,31

Rezultati obdelave druge epohe z namerno pokvarjeno kodno psevdo razdaljo do enega satelita za 10 m:

4293719,74 1110070,12 4569051,34

Odmik od položaja, ki smo ga pridobili z dejanskimi opazovanji: 0,09 m

Razlika je še bolj očitna, če je opazovanje pokvarjeno za večjo vrednost, npr. 50 m. Rezultati obdelave druge epohe z metodo najmanjših kvadratov:

4293704,62 1110082,51 4569052,86

Odmik od položaja, ki smo ga pridobili z dejanskimi opazovanji: 27,8 m

Rezultati obdelave druge epohe z robustno metodo:

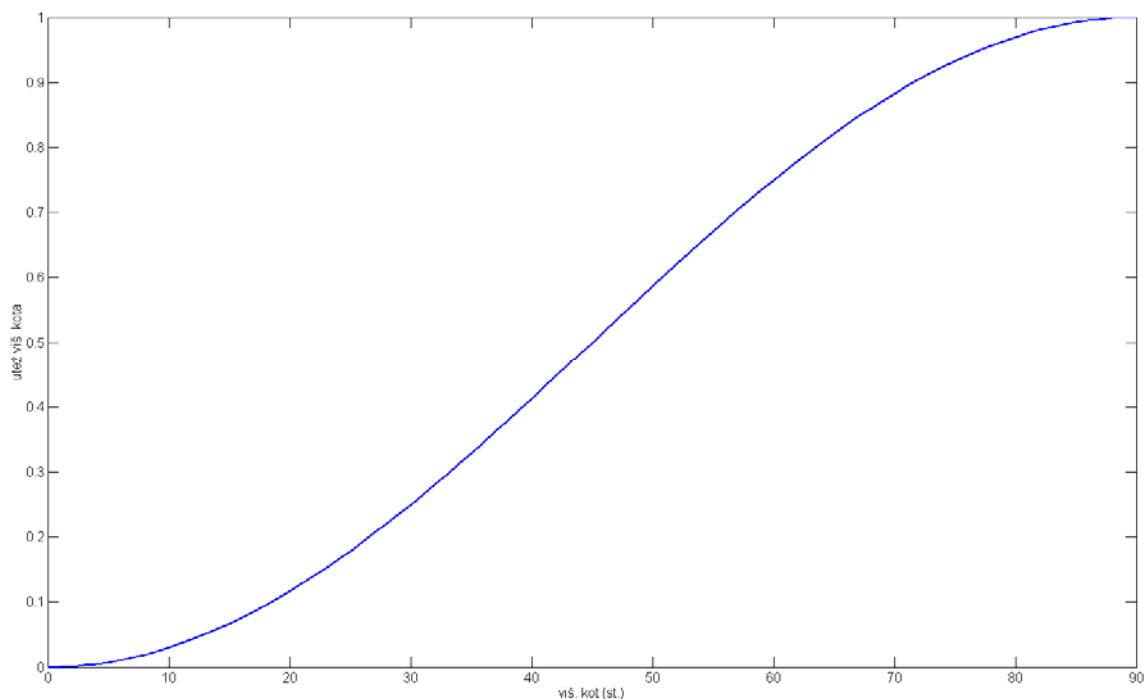
4293719,74 1110070,11 4569051,34

Odmik od položaja, ki smo ga pridobili z dejanskimi opazovanji: 0,08 m

Razlika v rezultatih obeh načinov obdelave je očitna. Robustna metoda je zelo neobčutljiva na nenadne spremembe vrednosti posameznega opazovanja, ki so lahko posledica odboja signala, oslavitve signala ali nenadne povečane prisotnosti šuma v opazovanju. Našteti vplivi, predvsem pa odboj signala oz. večpotje, lahko vplivajo na spremembe vrednosti izmerjenih psevdo razdalj za več 10 metrov. Kot lahko vidimo iz zgornjega primera, velike nenadne spremembe posameznega opazovanja v postopku robustne obdelave zelo malo vplivajo na končni rezultat, medtem ko je vpliv pri obdelavi po metodi najmanjših kvadratov zelo velik. Ob tem moramo poudariti, da smo namerno pokvarili zgolj eno od skupno 18 opazovanj v epohi.

4.3.5 Utež opazovanja glede na višinski kot satelita

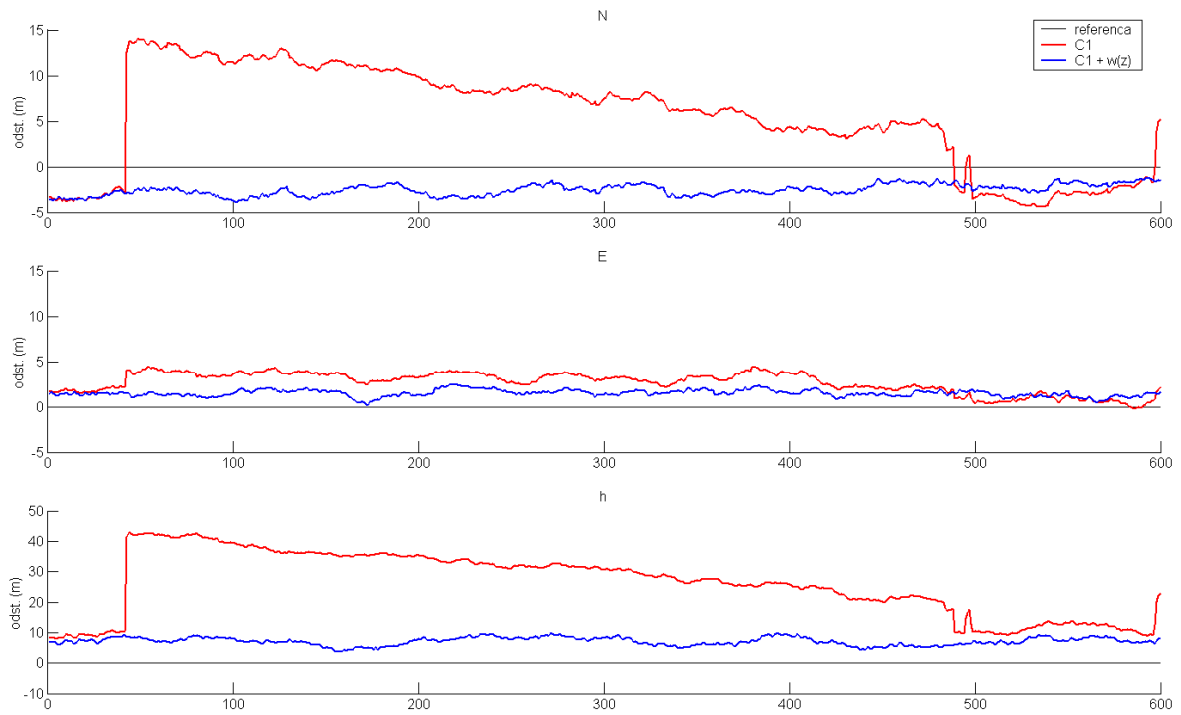
Utež višinskega kota izračunamo po enačbi (2-18). Slika 4-13 prikazuje velikost uteži v odvisnosti od višinskega kota satelita. Na horizontu je utež enaka 0 in se torej opazovanje ne upošteva, v zenitu je utež enaka 1.



Slika 4-13: Utež opazovanj glede na višinski kot satelita

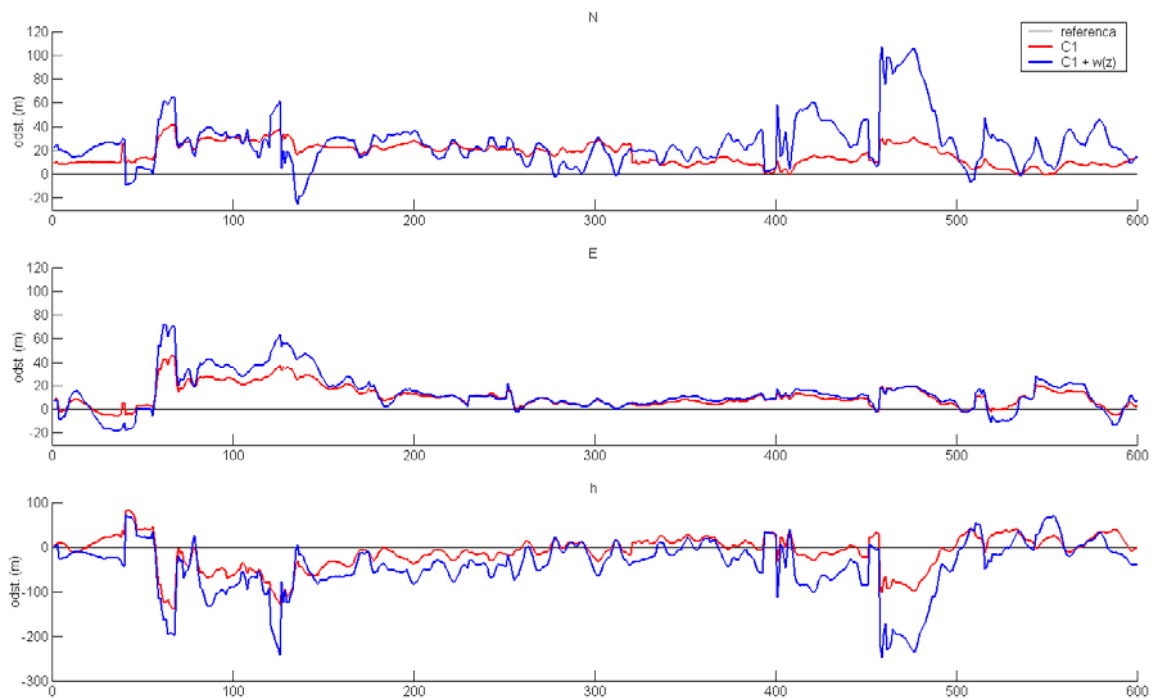
Fig 4-13: Elevation angle dependent weighting of observations

Slika 4-14 prikazuje rezultate obdelave kodnih psevdorazdalj brez upoštevanja uteži višinskega kota (rdeča barva) in z upoštevanjem uteži višinskega kota (modra barva) v neoviranih pogojih za sprejem signalov s satelitov. Obdelavo smo izvedli po metodi najmanjših kvadratov brez upoštevanja modelov atmosfere. Rešitev z upoštevanjem uteži opazovanj je očitno boljša. Največjo razliko opazimo v epohi, kjer se pojavi nov satelit, ki povzroči veliko spremembo v položaju. Signal z novega satelita je instrument sprejel pod nizkim višinskim kotom in je zato dobil zelo majhno utež, kar je pripomoglo k boljši rešitvi. Grafikon prikazuje odstopanja po komponentah od pravega položaja, ki je označen s črno barvo.



Slika 4-14: Uporaba uteži višinskega kota v neoviranih pogojih

Fig 4-14: Use of elevation angle dependent weighing in normal conditions

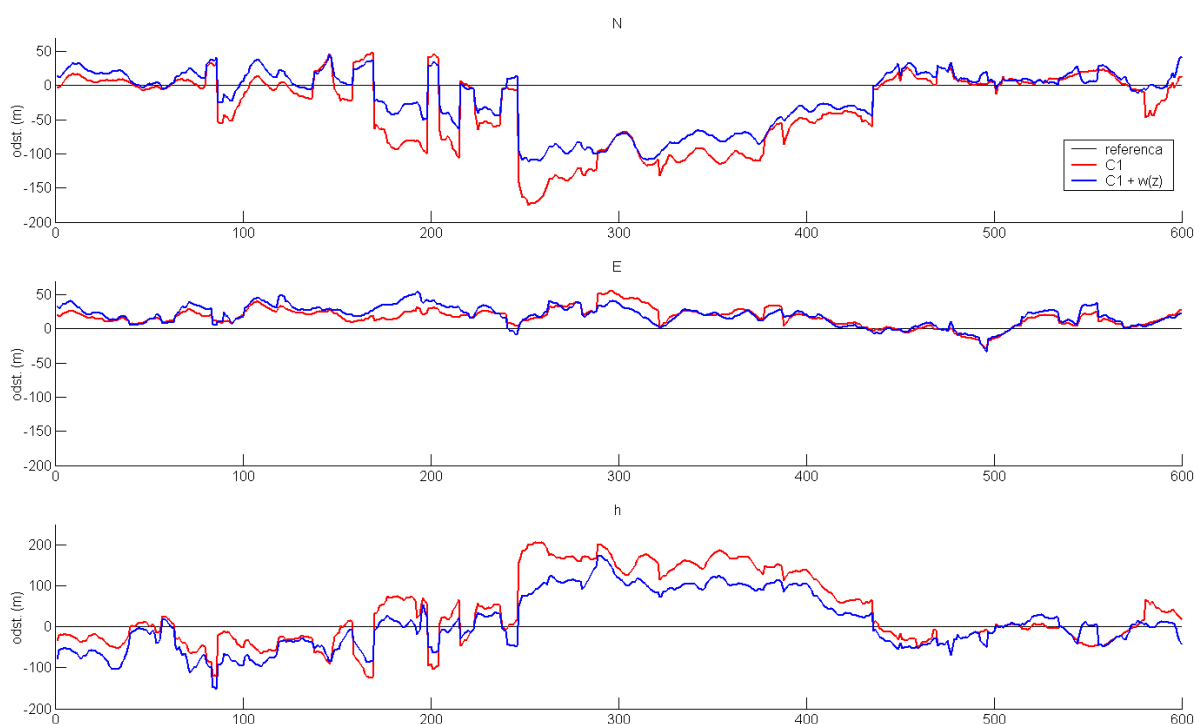


Slika 4-15: Uporaba uteži višinskega kota v oteženih pogojih

Fig 4-15: Use of elevation angle dependent weighing in challenging environments

Če se upoštevanje uteži višinskega kota izkaže kot koristno v neoviranih pogojih, to očitno ne velja za otežene pogoje, kar lahko razberemo iz slike 4-15. Slika prikazuje rezultate enakih načinov obdelave kot pri predhodni sliki. Odstopanja so opazno večja, če je v obdelavo vključena utež opazovanja glede na višinski kot satelita.

Slika 4-16 predstavlja rezultate obdelave za položaj (c) v notranjosti objekta. Rezultati obeh načinov so dokaj podobni, rezultati z upoštevanjem uteži višinskih kotov so boljši, a ne bistveno.



Slika 4-16: Uporaba uteži višinskega kota znotraj objekta

Fig 4-16: Use of elevation angle dependent weighting indoors

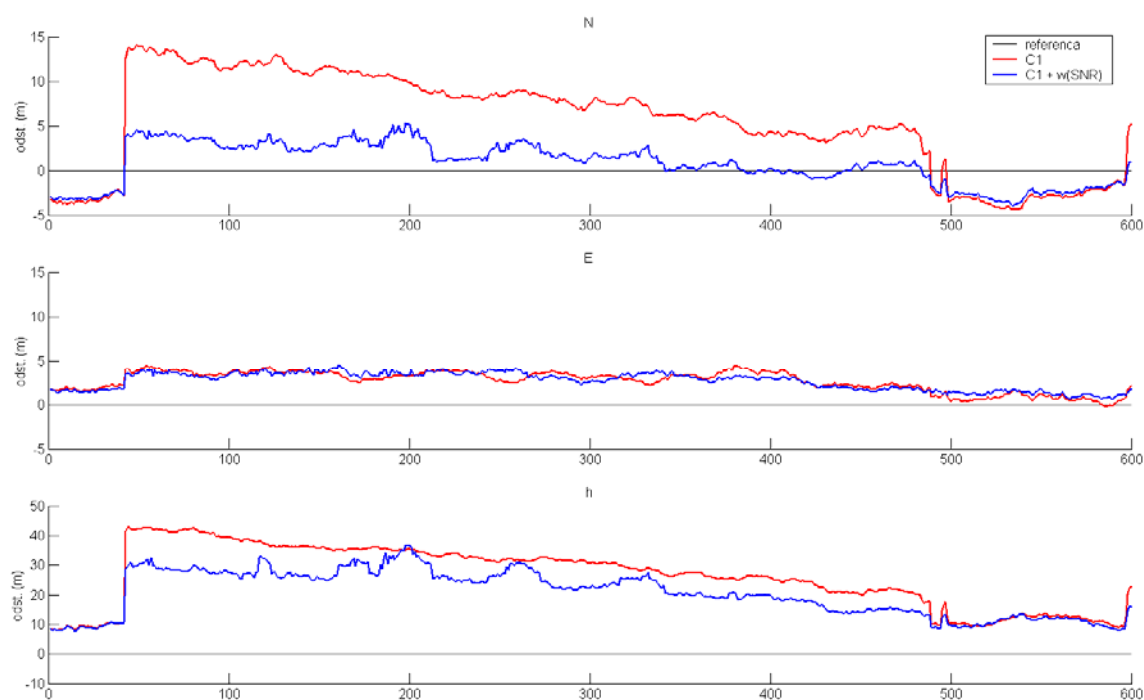
Na podlagi obravnavanih primerov lahko zaključimo, da držijo ugotovitve drugih avtorjev, ki smo jih predstavili v 2.7.7. Utež višinskega kota je smiselno uporabiti zgolj v neoviranih pogojih za sprejem signalov, kadar pa je v opazovanjih prisoten vpliv večpotja, lahko utež višinskega kota celo pokvari rezultate, kar dobro vidimo na sliki 4-15.

4.3.6 Utež opazovanja glede na razmerje moči in šuma signala

Razmerje moči in šuma signala v podatkih opazovanj označimo s SNR oz. C/N_0 . Vrednost SNR lahko v obdelavi opazovanj GPS upoštevamo na različne načine. V naslednjih primerih smo utež SNR izračunali po enačbi (2-20), faktor m je bil enak 0,2.

Signali, ki jih sprejme antena sprejemnika GPS neposredno, imajo običajno vrednosti SNR nad 40. Največja vrednost SNR, ki jo zaznajo testni sprejemniki, je 52. Vsi signali, ki se na poti do antene ne odbijejo in ne preidejo skozi oviro, imajo podobne vrednosti SNR. Predpostavljamo lahko, da v takih primerih utež glede na vrednost SNR nima velikega vpliva.

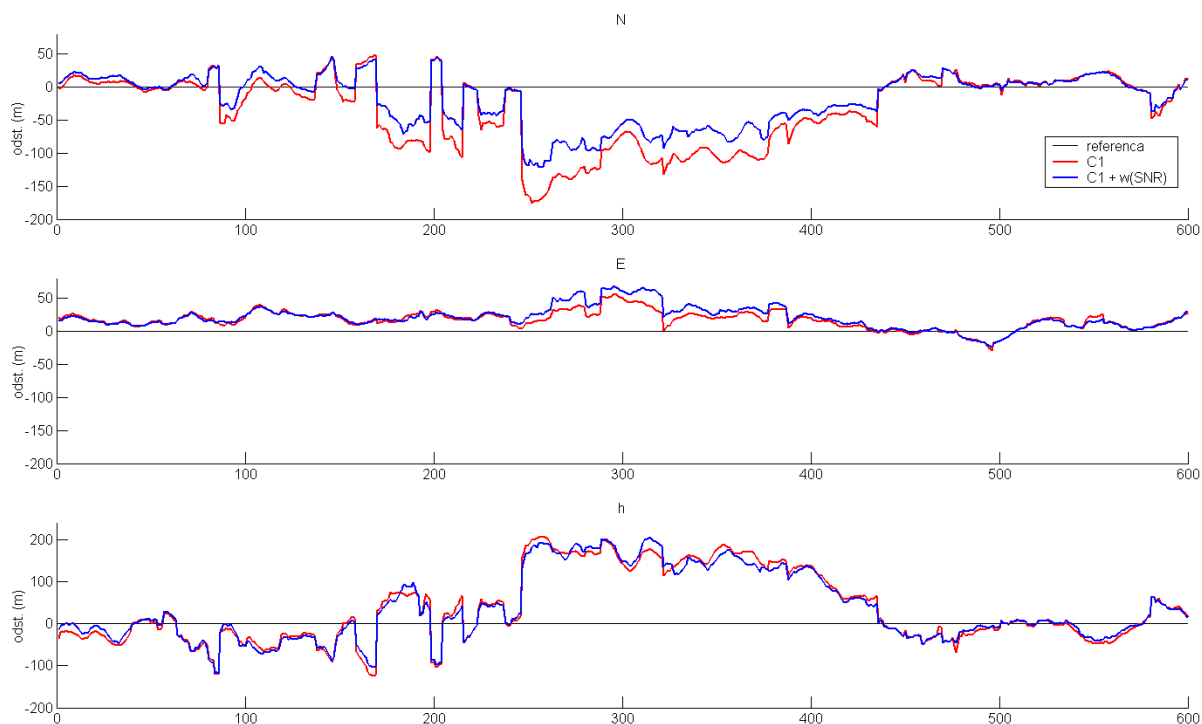
Slika 4-17 prikazuje rezultate obdelave kodnih psevdo razdalj brez uteži SNR (rdeča barva) in z upoštevanjem uteži SNR (modra barva). V obdelavi nismo upoštevali atmosferskih vplivov in drugih uteži opazovanj. Opazna razlika v rezultatih se pojavi v epohi, kjer pride do zaznave novega satelita. Nov satelit ima v trenutku pojava SNR 40, ostali signali pa imajo vrednosti SNR med 43 in 51. Upoštevanje uteži SNR v tem primeru zmanjša pogrešek v smeri N za pribl. 10 m.



Slika 4-17: Uporaba uteži opazovanja glede na SNR v neoviranih pogojih

Fig 4-17: Use of SNR weighting in normal conditions

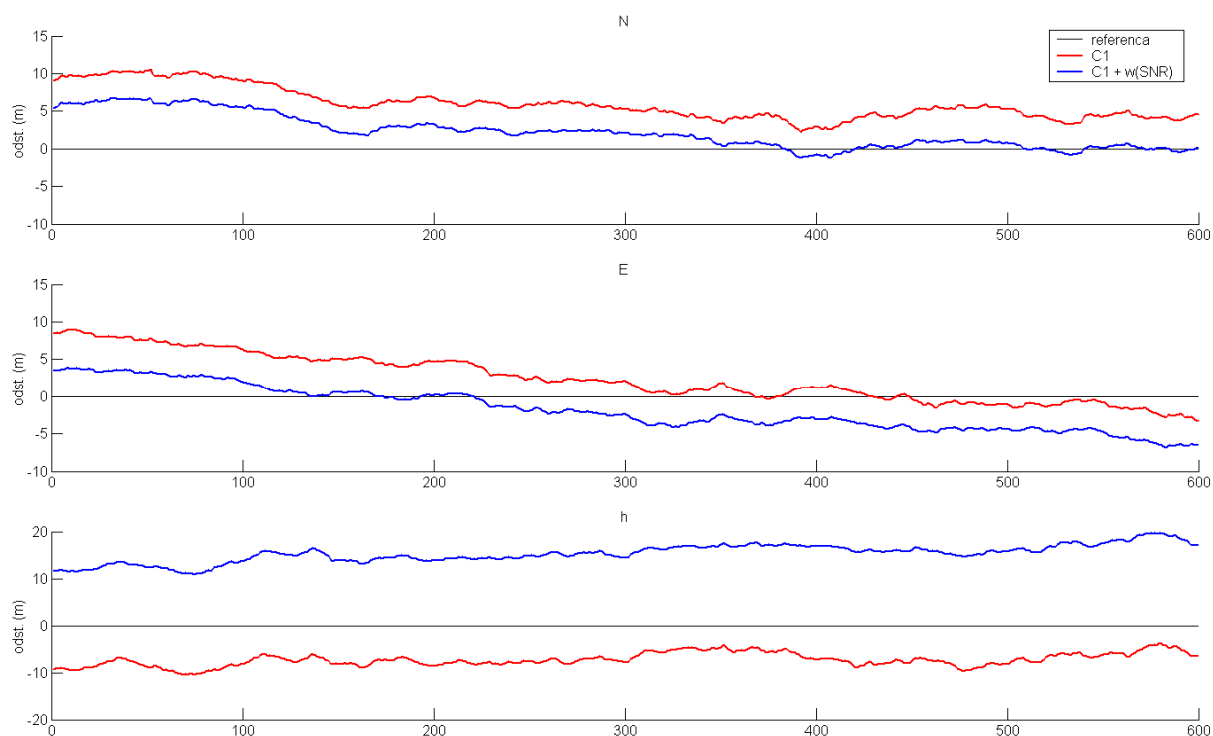
Obdelava z utežmi glede na SNR v oteženih pogojih izven ali znotraj objekta ne prinese velikega napredka v kakovosti položaja. Slika 4-18 predstavlja primer obdelave brez uteži SNR in z utežmi SNR znotraj objekta. Rezultati obdelave obeh načinov v oteženih pogojih izven objekta so v večini epoh podobni, v določenih epohah so rezultati obdelave z upoštevanjem uteži nekoliko boljši, lahko pa tudi slabši. Kot lahko vidimo na sliki 4-18, so lahko v istem trenutku rezultati boljši za eno komponento in slabši za drugo.



Slika 4-18: Uporaba uteži opazovanja glede na SNR v oteženih pogojih

Fig 4-18: Use of SNR weighting in challenging environments

Slika 4-19 prikazuje vpliv uporabe uteži SNR v robustnem načinu obdelave GPS opazovanj. Rdeča barva prikazuje položaje, ki smo jih pridobili z robustno obdelavo kodnih in Dopplerjevih opazovanj, modra pa položaje, ki smo jih izračunali z enakim načinom obdelave, le da smo upoštevali tudi uteži glede na SNR. V obdelavo nismo vključili atmosferskih popravkov in ostalih uteži. Opazimo lahko razliko v položaju začetne epohe, ki jo določimo samo s kodnimi opazovanji. V naslednjih epohah, kjer upoštevamo kodna in Dopplerjeva opazovanja, popravek urinega stanja sprejemnikove ure in položaj sprejemnika pa določamo ločeno, je razlika po komponentah zelo podobna kot v začetni epohi – grafikoni odstopanj so skoraj vzporedni.



Slika 4-19: Uporaba uteži opazovanja glede na SNR v robustni obdelavi

Fig 4-19: Use of SNR weighting in robust processing

4.3.7 Obdelava opazovanj z natančnimi efemeridami

Osnova za določitev položaja sprejemnika GPS je poznavanje točnega položaja satelitov v času opazovanja. Podatke o predvidenih položajih in urnem stanju satelitov ur oddajajo sateliti v navigacijskem sporočilu, zato te podatke imenujemo oddane efemeride. Namesto oddanih efemerid lahko uporabimo tudi natančne efemeride, kot smo zapisali v 2.7.6. Natančne efemeride lahko načeloma pridobimo samo za naknadno obdelavo opazovanj GPS.

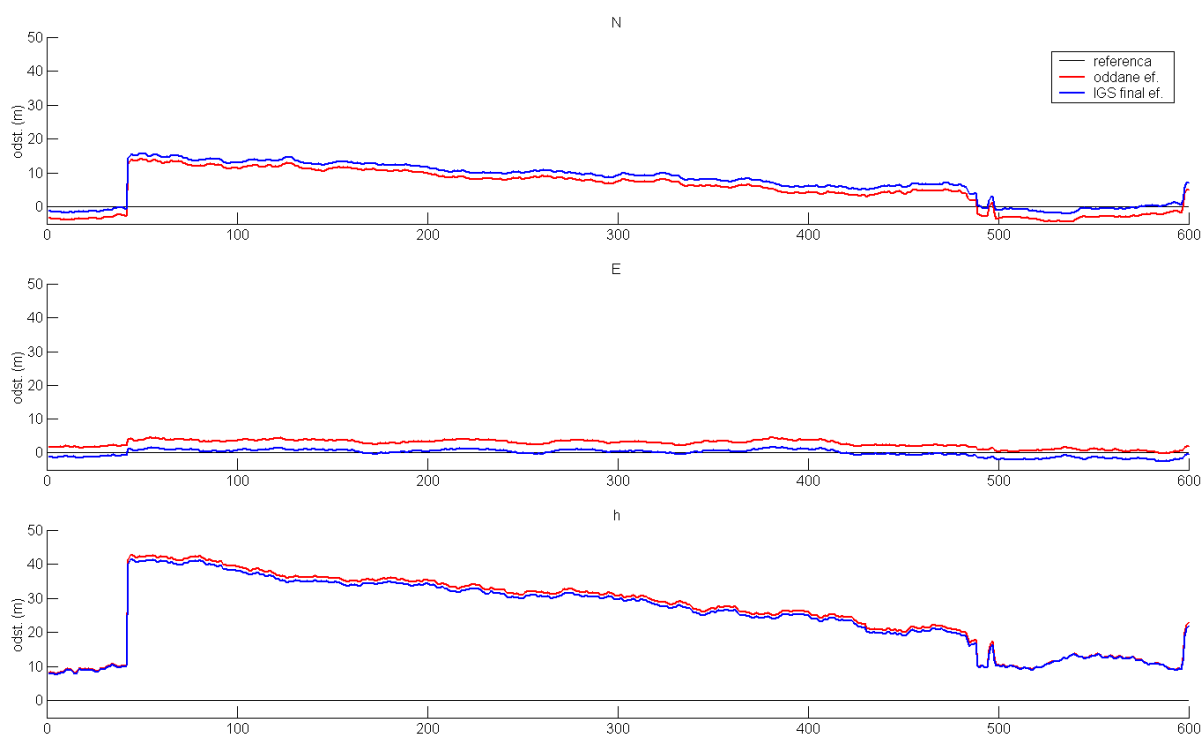
Na primeru opazovanj v neoviranih pogojih za sprejem signalov s satelitov smo obdelali kodna opazovanja z oddanimi efemeridami in z vsemi tremi tipi natančnih efemerid IGS. V obdelavi opazovanj nismo upoštevali modelov atmosfere in uteži opazovanj. Preglednica 4-1 vsebuje vrednosti koordinat začetnega položaja, ki smo ga pridobili v obdelavi z uporabo natančnih efemerid (»IGS final«, »IGS rapid« in IGS »ultra-rapid«) in oddanih efemerid. Tipe efemerid IGS smo predstavili v 2.7.6. Razlike posameznih rešitev so zapisane v zadnjih treh

stolpcih, pri čemer smo za referenčno vrednost izbrali položaj, ki smo ga določili z efemeridami »IGS final«.

Preglednica 4-1: Primerjava rezultatov obdelave z natančnimi in oddanimi efemeridami

Table 4-1: Comparison of results using precise and broadcast ephemerides

	N (m)	E(m)	h (m)	$\Delta N(m)$	$\Delta E(m)$	$\Delta h(m)$
IGS final	100810,3	460936,8	375,3			
IGS rapid	100810,3	460936,8	375,4	0,0	0,0	0,1
IGS ultra-rapid	100810,8	460936,7	377,4	0,5	-0,1	2,1
oddane	100808,2	460939,8	375,6	-2,1	3,0	0,3



Slika 4-20: Primerjava rezultatov obdelave z natančnimi in oddanimi efemeridami

Fig 4-20: Comparison of processing results with precise and broadcast ephemerides

Razlike med posameznimi rešitvami v naslednjih epohah so podobne. V času izmere 10 minut so absolutne razlike med položaji, ki smo jih pridobili z efemeridami »IGS final« in oddanimi

efemeridami, naslednje: po komponenti N med 1,6 in 2,4 m, po komponenti E med 2,3 in 3,0 m ter po komponenti h med 0,1 in 1,3 m. Slika 4-20 predstavlja grafično primerjavo obeh rešitev. Zaradi primerjave odstopanj je merilo pokončne osi, ki prikazuje odstopanja, enaka za vse tri komponente.

4.4 Vpliv tipov opazovanj, modelov, uteži in specifičnih postopkov na rezultate

Glede na razpoložljive podatke opazovanj preizkusnih instrumentov lahko za določitev položaja uporabimo kodna opazovanja, Dopplerjeva opazovanja in kombinacijo obeh tipov opazovanj. Opazovanja GPS lahko v model vključimo neposredno z merjenimi vrednostmi, lahko pa jim na različne načine določimo uteži. V postopku obdelave opazovanj moramo poleg prostorskih komponent položaja določiti tudi popravek urinega stanja sprejemnikove ure. Navedene štiri neznanke lahko v iteracijskem postopku določamo hkrati ali pa ločeno določamo popravek sprejemnikove ure in položaj.

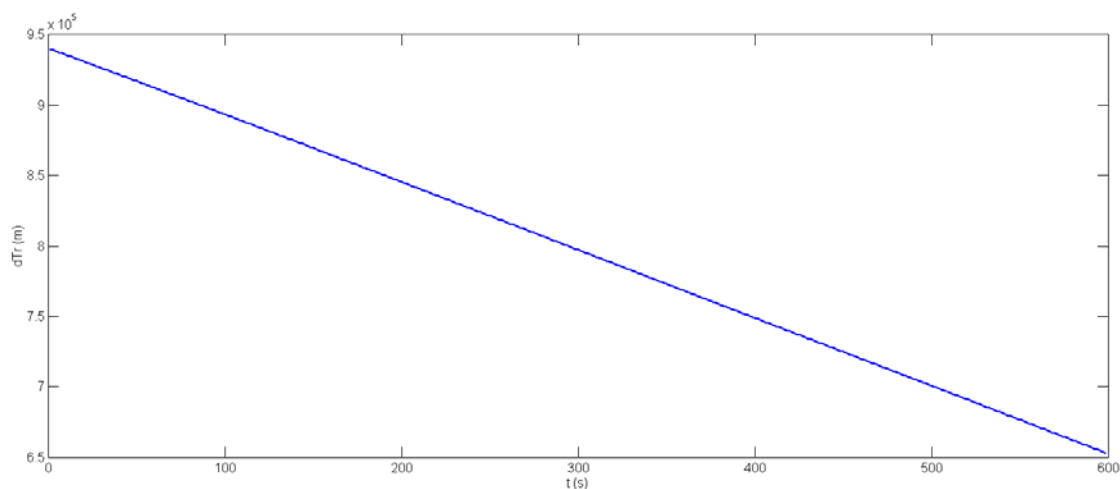
4.4.1 Kodna opazovanja

Osnovna količina za avtonomno določitev položaja so kodne psevdo razdalje. Obenem so to najmanj natančna opazovanja, saj imajo najmanjšo ločljivost in nanje zelo vpliva pogrešek večpotja. Posledica so veliki pogreški položajev v oteženih pogojih za sprejem signalov s satelitov.

Če izvajamo opazovanja GPS v neoviranih pogojih, lahko tudi s kodnimi opazovanji dosežemo točnost nekaj metrov. Položaj lahko dodatno izboljšamo s tehnikami, ki so splošno uveljavljene v praktični uporabi GPS. Najboljše rezultate nedvomno nudi tehnika DGPS, ki dvigne točnost položajev na nivo enega metra. Primerjavo avtonomno določenih položajev in DGPS-položajev prikazuje slika 4-5. V postopku obdelave lahko uporabimo tudi utež višinskega kota, ki v konkretnem primeru, prikazanem na sliki 4-14, zelo izboljša končno rešitev. Boljše rezultate lahko dosežemo tudi z uporabo uteži glede na razmerje moči in šuma signala SNR – primerjava je na sliki 4-17.

V oteženih pogojih je situacija povsem drugačna, saj tehnike iz prejšnjega odstavka bistveno ne pripomorejo k boljši rešitvi, lahko pa celo pokvarijo rešitev, kar lahko ugotovimo iz več prikazov v 4.3, npr. na slikah 4-6, 4-15 in 4-18.

Poglaviten razlog za velike nenadne skoke v položaju, predvsem v višinski komponenti, je netočna določitev neznanke urinega stanja sprejemnikove ure. Slika 4-21 prikazuje grafikon vrednosti popravkov sprejemnikove ure dTr za referenčni primer opazovanja v neoviranih pogojih, ki smo ga večkrat prikazali že v 4.3. Vrednosti dTr smo zaradi lažje predstave izrazili v metrih. Dejanske časovne vrednosti dTr so zelo majhne, običajno segajo do 1 ms. Večina sprejemnikov opravi t.i. ponastavitev ure, ko odmik od pravega časa GPS preseže 1 ms. Vrednosti v metrih dobimo tako, da časovno vrednost dTr pomnožimo s hitrostjo širjenja valovanja, t.j. s svetlobno hitrostjo. Vrednosti dTr se v tem primeru gibljejo med 939817 in 652958 m. Popravek dTr je vsako sekundo manjši za pribl. 480 m. Grafikon popravkov dTr ne pokaže nič bistvenega, saj zaradi velikih vrednosti na navpični osi izgleda povsem linearen.

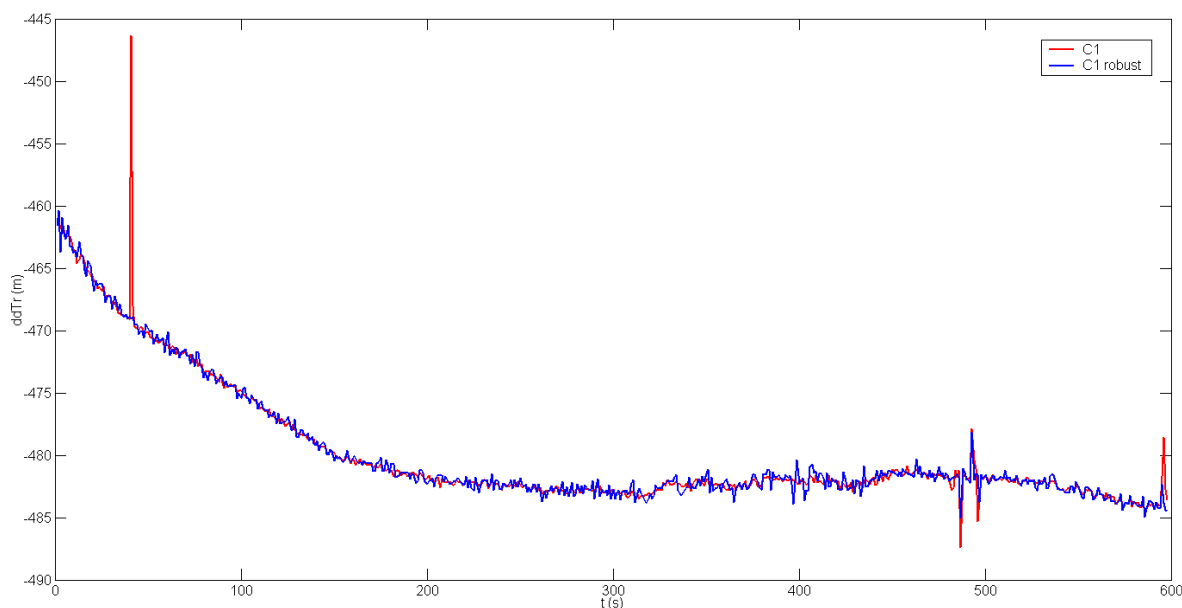


Slika 4-21: Grafikon popravkov sprejemnikove ure

Fig 4-21: Receiver clock offset estimation values

Bolj nazoren je grafikon, ki ga dobimo s tvorjenjem razlik zaporednih popravkov dTr . Slika 4-22 predstavlja spremembe popravkov dTr za primera obdelave po metodi najmanjših kvadratov (rdeča barva) in z robustno metodo L1-norma (modra barva). T.i. »špice«, ki ponazarjajo nenadne velike spremembe v določitvi dTr , se praviloma pojavijo ob pojavu

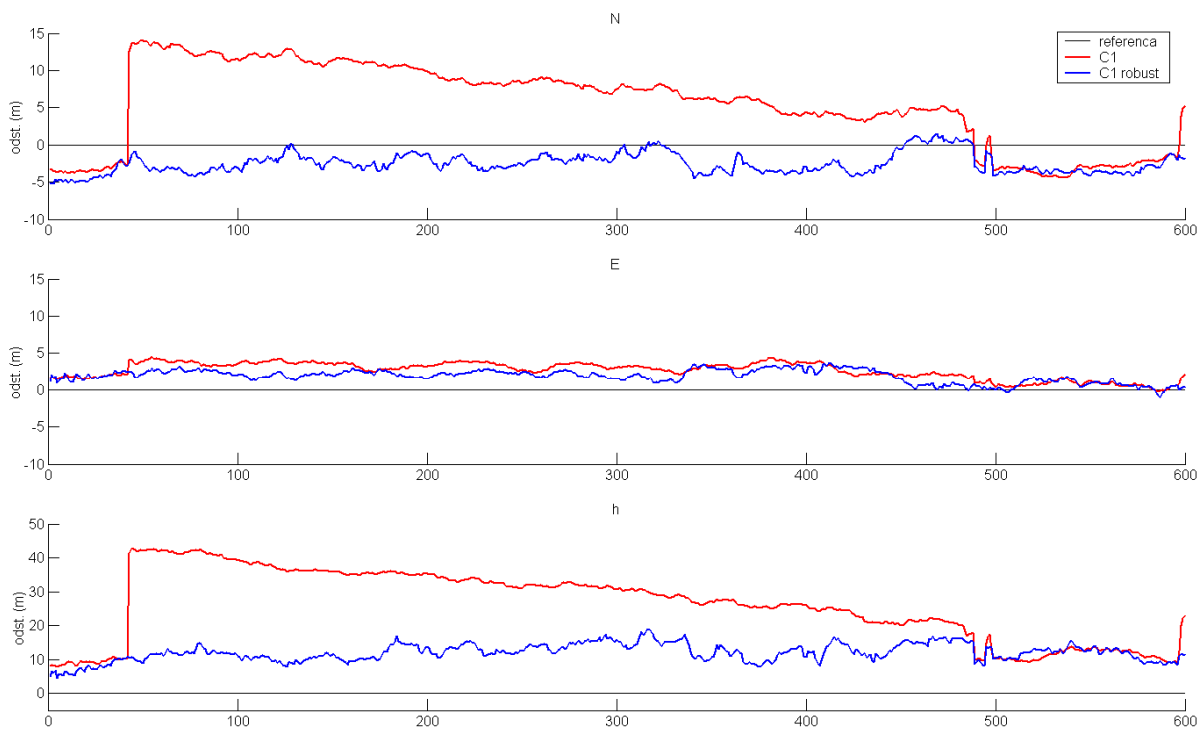
novega satelita ali prenehanju sledenja katerega od obstoječih satelitov. V tem primeru se je v 43. epohi pojavil nov, 10. satelit. Nekaj pred 500. epoho pride do občasne izgube 10. satelita, po 500. epohi je v vsaki epohi po 9 satelitov. Povsem na koncu meritev, v zadnjih štirih epohah, se ponovno pojavi 10. satelit. Vsaka od teh sprememb se očitno pozna na grafikonu, seveda pa ne vsaka z isto močjo. Slika 4-22 razvidno pokaže, da robustna metoda zaduši velike nenadne skoke.



Slika 4-22: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure v neoviranih pogojih

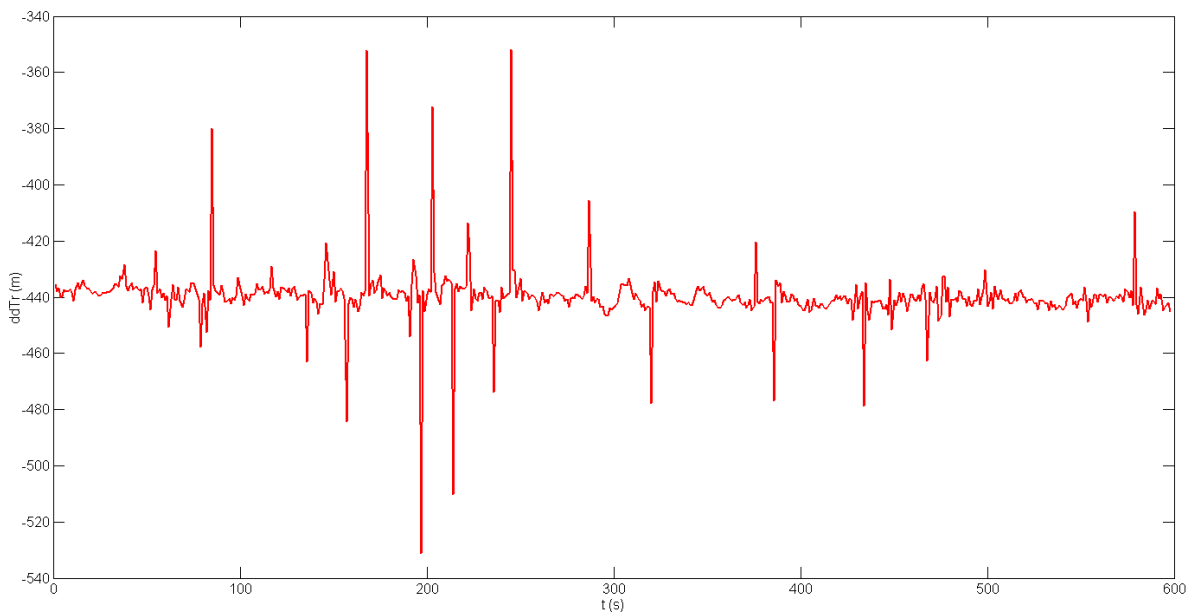
Fig 4-22: Variations of receiver clock offset estimates in normal conditions

Pogreški v določitvi popravka sprejemnikove ure običajno vplivajo predvsem na višinsko komponento, in to običajno za približno enako vrednost kot je odmik od pričakovane vrednosti. Kot lahko vidimo na sliki 4-23, pa tovrstni pogrešek lahko vpliva tudi na horizontalno komponento položaja, v tem primeru na komponento N. Rezultati obdelave z metodo najmanjših kvadratov (MNK) so prikazani z rdečo barvo. Robustna obdelava, katere rezultati so prikazani z modro barvo, po pričakovanjih vsebuje manjša odstopanja.



Slika 4-23: Rezultati obdelave kodnih opazovanj z MNK in robustno metodo

Fig 4-23: Results of least squares and robust processing of code observations

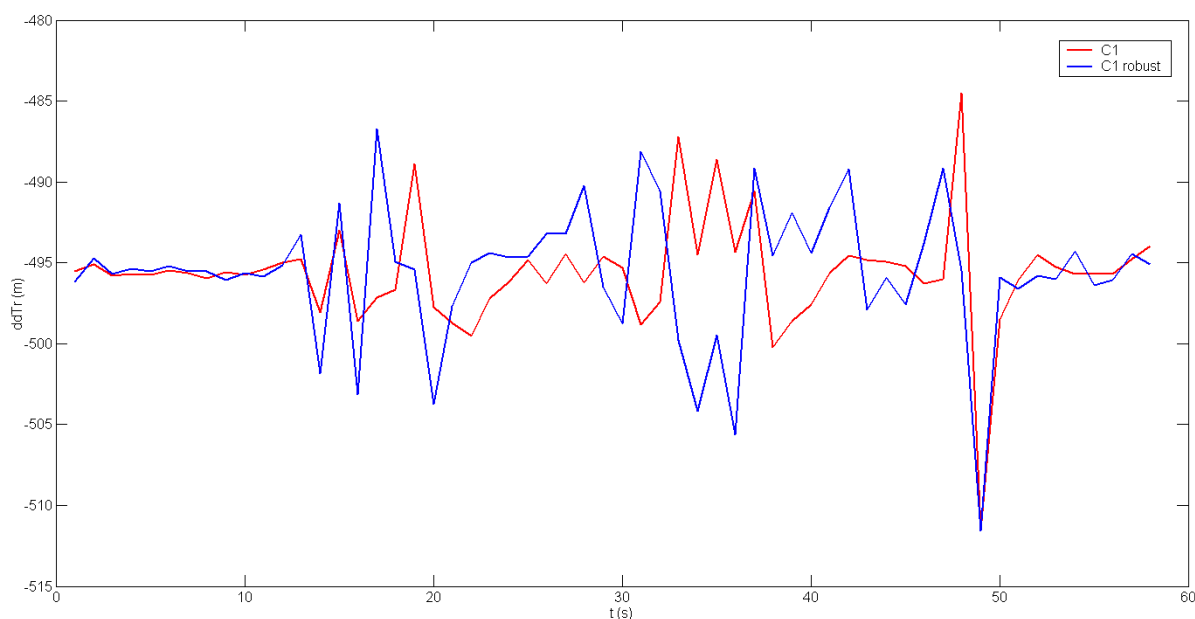


Slika 4-24: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure pri opazovanjih znotraj objekta

Fig 4-24: Variations of receiver clock offset estimates in indoor situation

V oteženih pogojih, še posebej pa znotraj objektov, se sestava sprejetih signalov med epohami zelo pogosto spreminja. Pričakujemo lahko veliko število »špic« na grafikonu sprememb popravkov sprejemnikove ure, kar dokazuje slika 4-24. Odmiki od navidezno glajene linije so lahko večji od 80 m. Koordinate točk po komponentah so na sliki 4-7 označeni z modro barvo. Robustna metoda obdelave v tem primeru ne deluje najbolje, saj v precej epohah iteracija ne konvergira. Slika 4-24 prikazuje samo rezultate obdelave po metodi najmanjših kvadratov.

Metode obdelave smo testirali tudi v kinematičnem načinu v mešanih pogojih v okolju (d). Slika 4-25 predstavlja spremembe popravkov sprejemnikove ure pri obdelavi opazovanj v tem okolju po metodi najmanjših kvadratov (rdeča barva) in z robustno metodo L1-norma (modra barva).

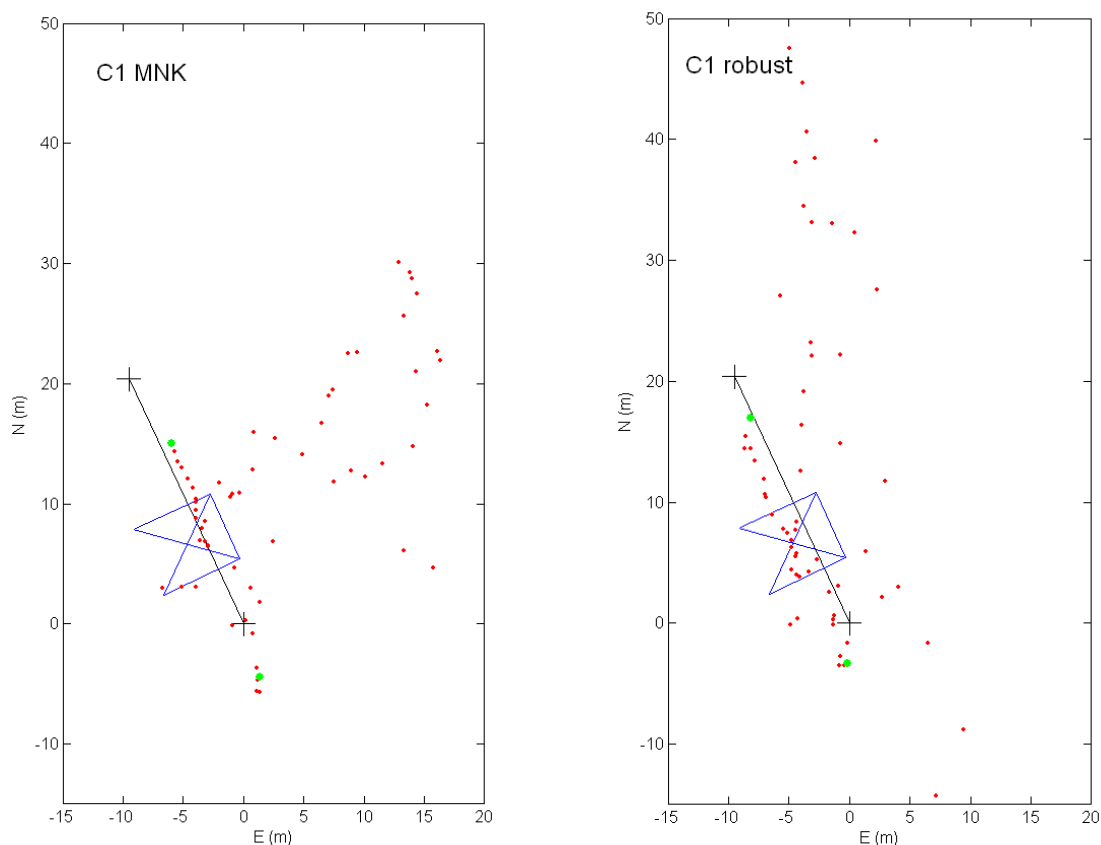


Slika 4-25: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure v mešanih pogojih

Fig 4-25: Variations of receiver clock offset estimates in mixed conditions

Slika 4-26 prikazuje rezultate obeh načinov obdelave. Na levi strani so položaji, ki smo jih izračunali z metodo najmanjših kvadratov (MNK), na desni strani z robustno metodo L1-norma. Položaji točk so prikazani v ravnini projekcije, črna črta nakazuje trajektorijo gibanja,

z modro barvo je označen približen položaj dela nadstrešnice, ki se nadaljuje na delu, ki ni zaključen, z zelenima pikama pa sta označena začetni in končni položaj.



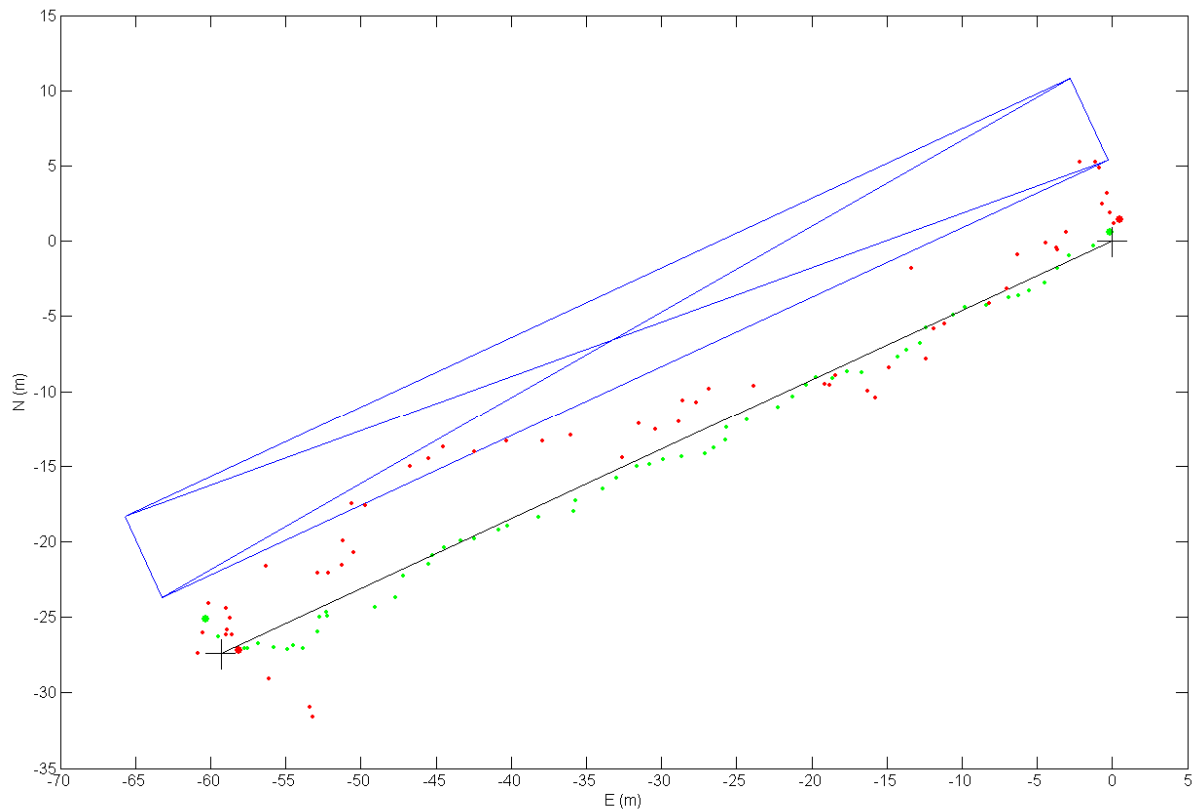
Slika 4-26: Rezultati MNK in robustne metode v mešanih pogojih

Fig 4-26: Results of least squares and robust estimation in mixed conditions

Na podlagi zgornjih prikazov lahko sklepamo, da so kodna opazovanja poleg večpotja zelo občutljiva tudi na spremembe v sestavi satelitov, torej ob pojavu novega satelita ali ob prenehanju sledenja kakšnega od obstoječih satelitov. Robustna metoda se dobro obnese v neoviranih pogojih (primer na sliki 4-23), v oteženih pogojih pa slabše (primer na slikah 4-25 in 4-26).

Podobne rezultate kaže tudi kinematična izmera v okolju (e), kot lahko vidimo na sliki 4-27. Z zelenimi pikami so označeni položaji izmere neposredne poti med skrajnimi točkama, ki sta označeni z znakom »+««. Prvi in končni položaj sta označena z odebeljenima pikama. Enake oznake veljajo za izmero, ki večinoma poteka pod nadstrešnico, le da so položaji označeni z

rdečimi pikami. Moder lik ponazarja položaj nadstrešnice. Število sprejetih signalov s satelitov »na odprtem« je 10, pod nadstrešnico imamo v večini epoh podatke s 7-8 satelitov, v eni epohi število satelitov pade na 5.



Slika 4-27: Kodna opazovanja v neoviranih in mešanih pogojih

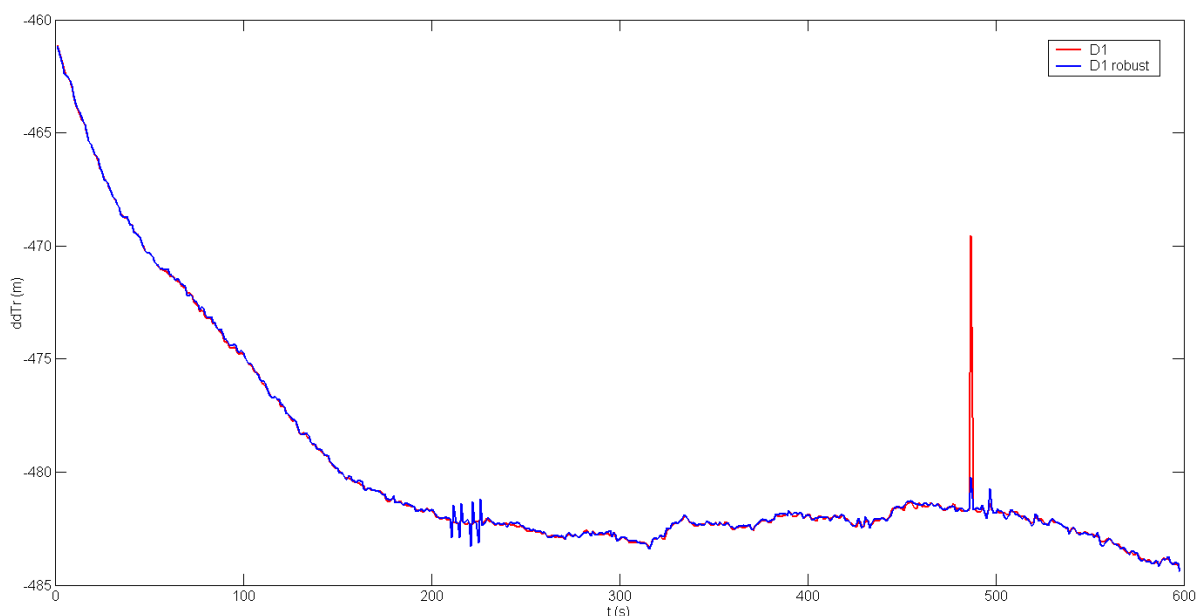
Fig 4-27: Code observations in normal and mixed conditions

4.4.2 Dopplerjeva opazovanja

Vlogo Dopplerjevih opazovanj pri avtonomni določitvi položaja smo opisali v 2.7.1. Na podlagi Dopplerjevega efekta ne moremo določiti absolutne razdalje do satelita, lahko pa izračunamo relativno hitrost približevanja oz. oddaljevanja sprejemnika in satelita ter posledično spremembo razdalje. Za uporabo Dopplerjevih opazovanj torej potrebujemo znan položaj sprejemnika ali znane začetne razdalje med sateliti in sprejemnikom. Le-te pa lahko pridobimo zgolj iz kodnih opazovanj. Začetni položaj torej v vsakem primeru določimo samo s kodnimi opazovanji. V izračun položajev naslednjih epoh pa lahko vključimo tudi Dopplerjeva opazovanja. V primeru pojava novega satelita, za katerega nimamo podatka o

psevdo razdalji v predhodni epohi, si pomagamo z izračunanim položajem v predhodni epohi, na podlagi katerega izračunamo začetno razdaljo do novega satelita.

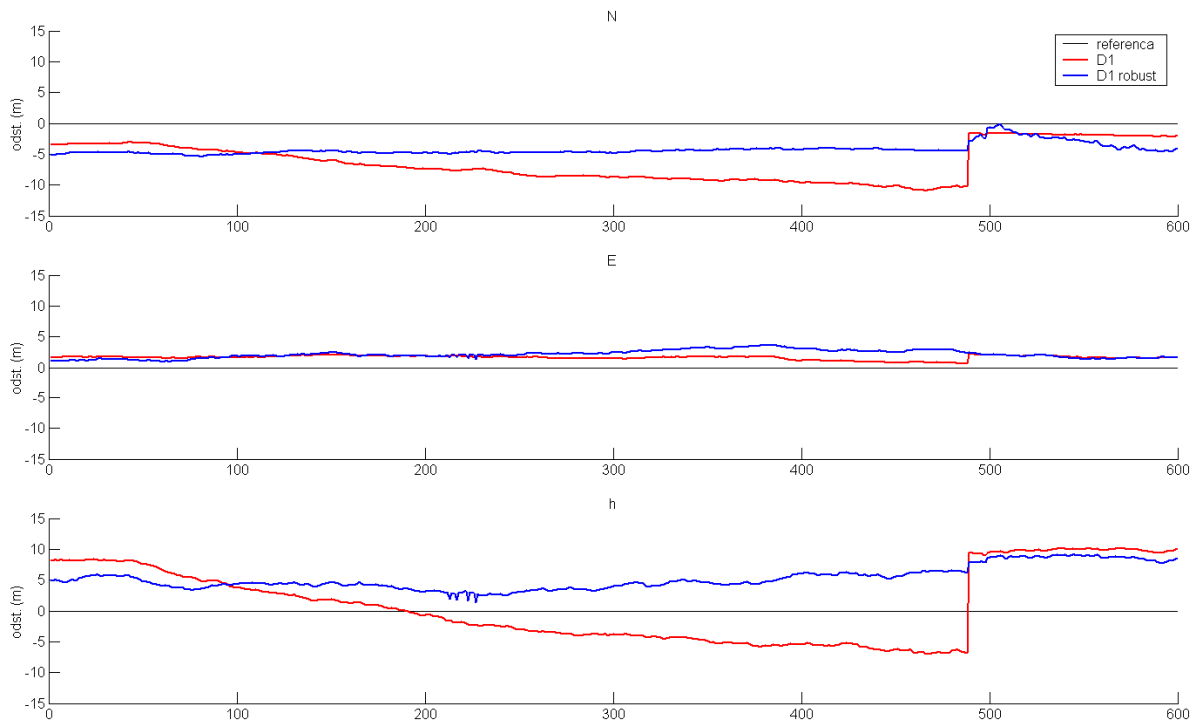
Slika 4-28 prikazuje spremembe popravkov sprejemnikove ure pri obdelavi Dopplerjevih opazovanj (D1) v neoviranih pogojih z metodo najmanjših kvadratov (rdeča barva) in robustno metodo L1-norma (modra barva). Linija na grafikonu je precej bolj gladka kot v primeru kodnih opazovanj (glej sliko 4-22), še vedno pa lahko pride do t.i. »špic«, nenadnih skokov, ki pa so manjši kot pri kodnih opazovanjih. Pri robustni obdelavi so nihanja manjša kot pri metodi najmanjših kvadratov.



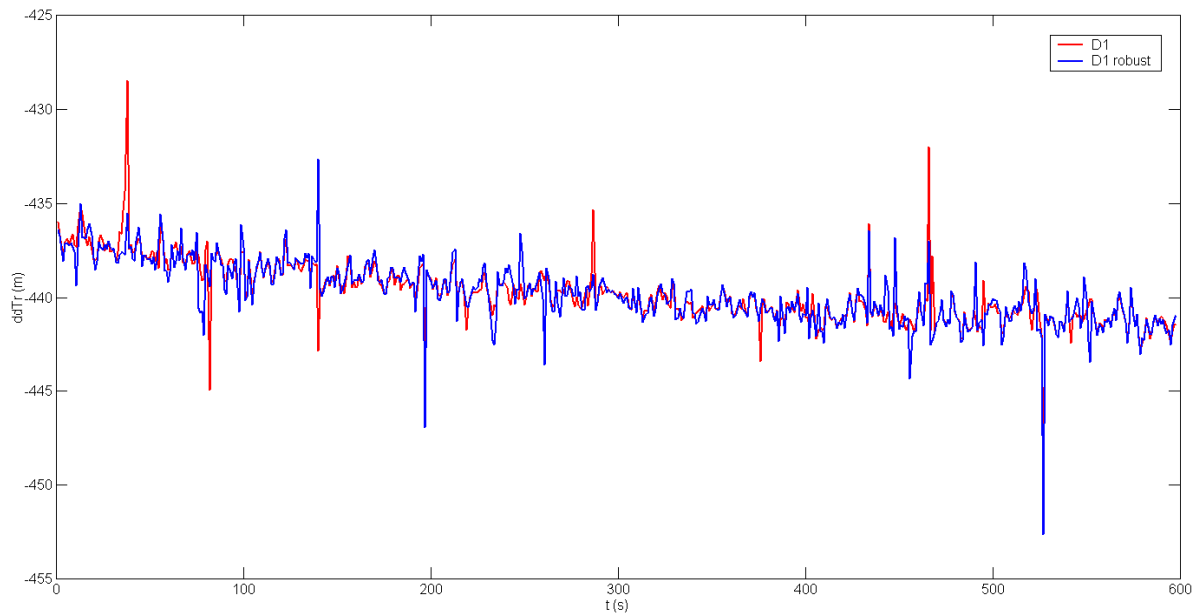
Slika 4-28: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure pri obdelavi D1 v neoviranih pogojih

Fig 4-28: Variations of receiver clock offset estimates in Doppler processing in normal conditions

Posledico netočne določitve popravka sprejemnikove ure lahko vidimo na sliki 4-29, ko se v 489. epohi višina h spremeni za 16 m, N za pribl. 8,5 m in E za pribl. 1,5 m.

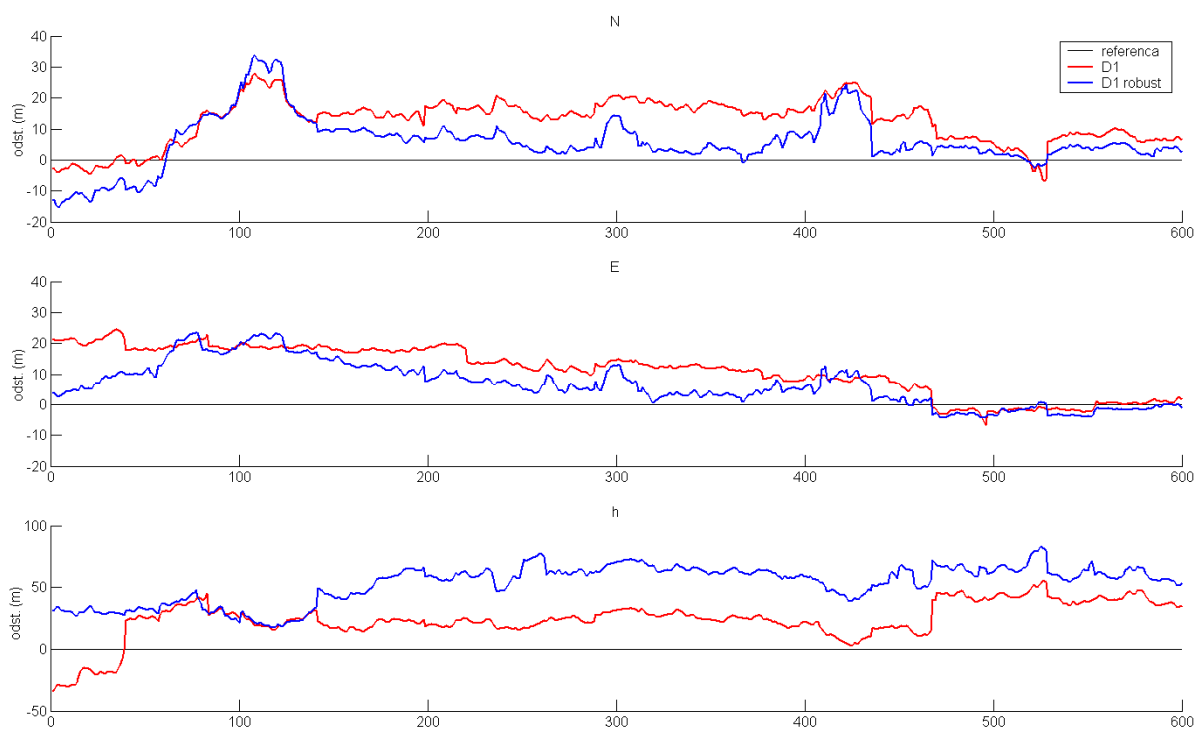


Slika 4-29: Rezultati obdelave D1 z MNK in robustno metodo v neoviranih pogojih
Fig 4-29: Results of least squares and robust Doppler processing in normal conditions



Slika 4-30: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure pri obdelavi D1 znotraj objekta
Fig 4-30: Variations of receiver clock offset estimates in D1 indoor processing

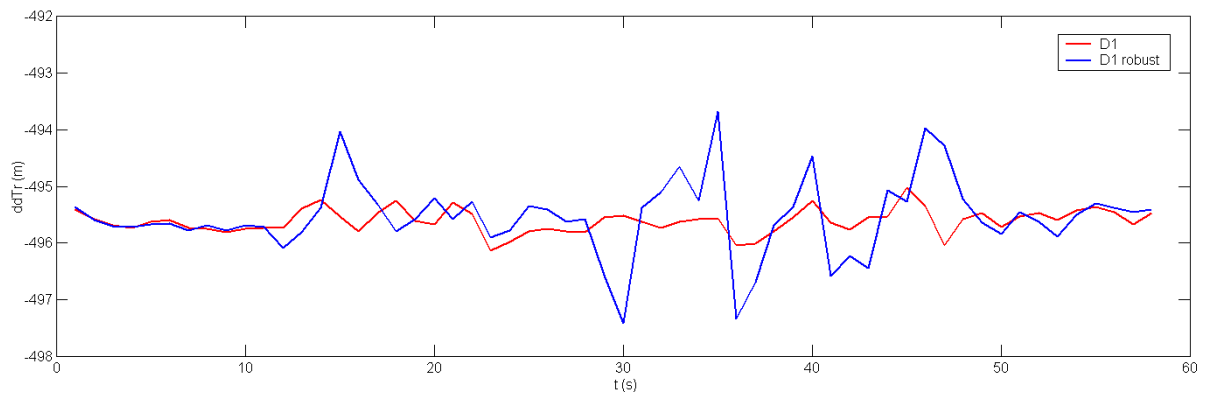
V oteženih pogojih in znotraj objektov je slika drugačna. Sliki 4-30 in 4-31 prikazujeta spremembe popravkov sprejemnikove ure in položaje, ki smo jih pridobili z metodo najmanjših kvadratov (rdeča barva) in robustno metodo L1-norma (modra barva). Obdelava začetne epohe z robustno metodo ni konvergirala, pa tudi nasploh metoda ni prinesla izboljšanja kakovosti rezultatov v primerjavi z običajno obdelavo po metodi najmanjših kvadratov.



Slika 4-31: Rezultati obdelave D1 z MNK in robustno metodo znotraj objekta

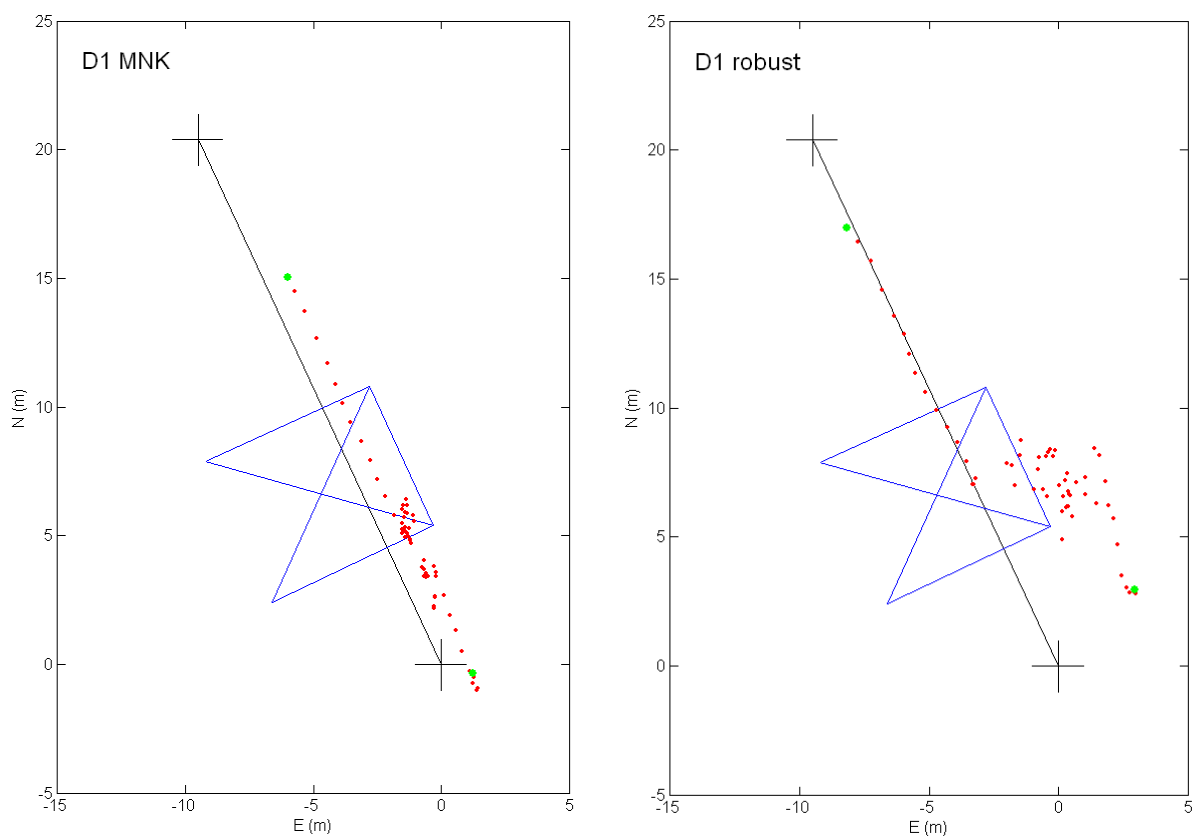
Fig 4-31: Results of least squares and robust D1 indoor processing

Slika 4-32 prikazuje spremembe popravkov sprejemnikove ure, ki smo jih izračunali z metodo najmanjših kvadratov (rdeča barva) in robustno metodo L1-norma (modra barva) v mešanih pogojih s kinematično izmero. Slika 4-33 prikazuje položaje, pridobljene z istima metodama obdelave.



Slika 4-32: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure pri obdelavi D1 v mešanih pogojih

Fig 4-32: Variations of receiver clock offset estimates in D1 processing in mixed conditions

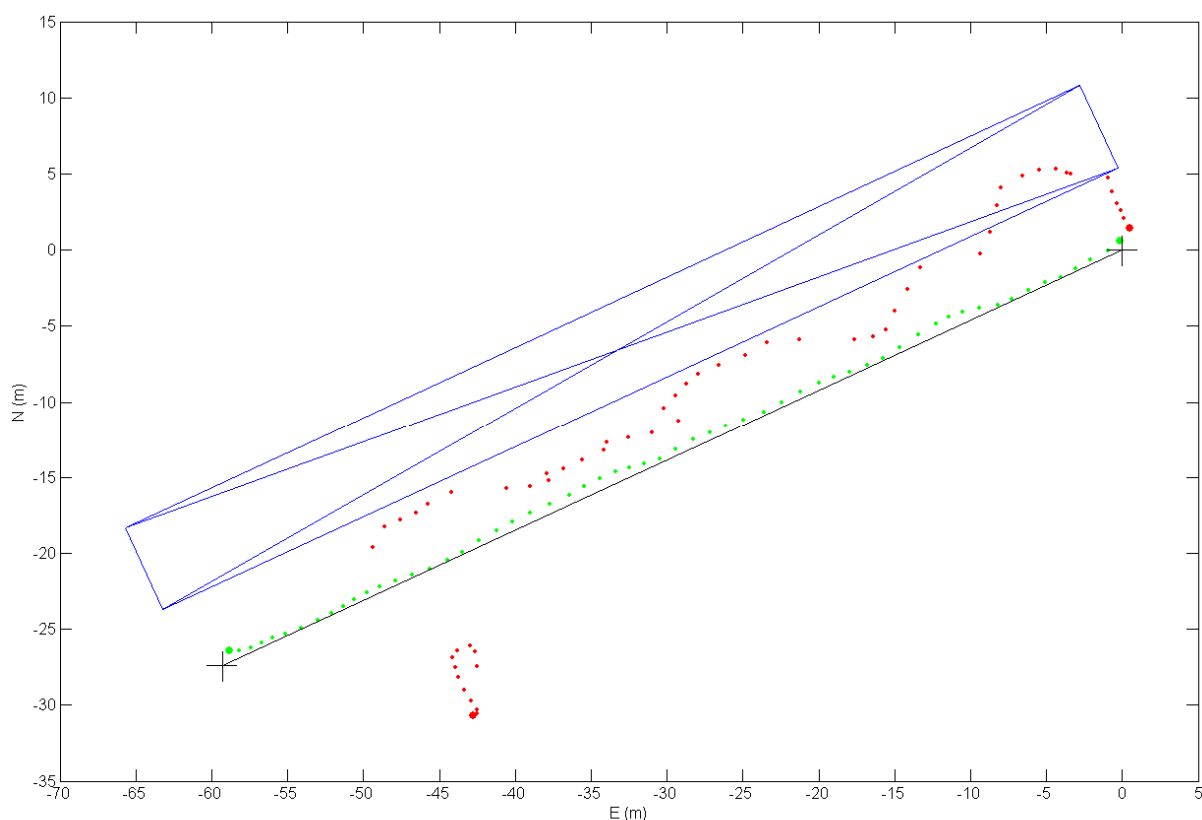


Slika 4-33: Rezultati MNK in robustne metode z obdelavo D1 v mešanih pogojih

Fig 4-33: Results of D1 least squares and robust estimation in mixed conditions

Rezultati obdelave z Dopplerjevimi opazovanji kažejo precej manjša odstopanja od začrtane linije gibanja v primerjavi s kodnimi opazovanji. Podobno kot pri kodnih opazovanjih pa robustne metode ne zagotovijo izboljšave rezultatov v oteženih pogojih oz. celo poslabšajo rezultate.

Slika 4-34 predstavlja rezultate obdelave Dopplerjevih opazovanj po metodi najmanjših kvadratov v okolju (e). Dopplerjeva opazovanja v neoviranih pogojih delujejo zelo dobro, žal pa je slika v oteženih pogojih precej drugačna. Na sliki 4-34 vidimo, da lahko tudi v primeru Dopplerjevih opazovanj pride do nenadnih sprememb v položaju, v tem primeru za pribl. 10 m.



Slika 4-34: Dopplerjeva opazovanja v neoviranih in mešanih pogojih

Fig 4-34: Doppler observations in normal and mixed conditions

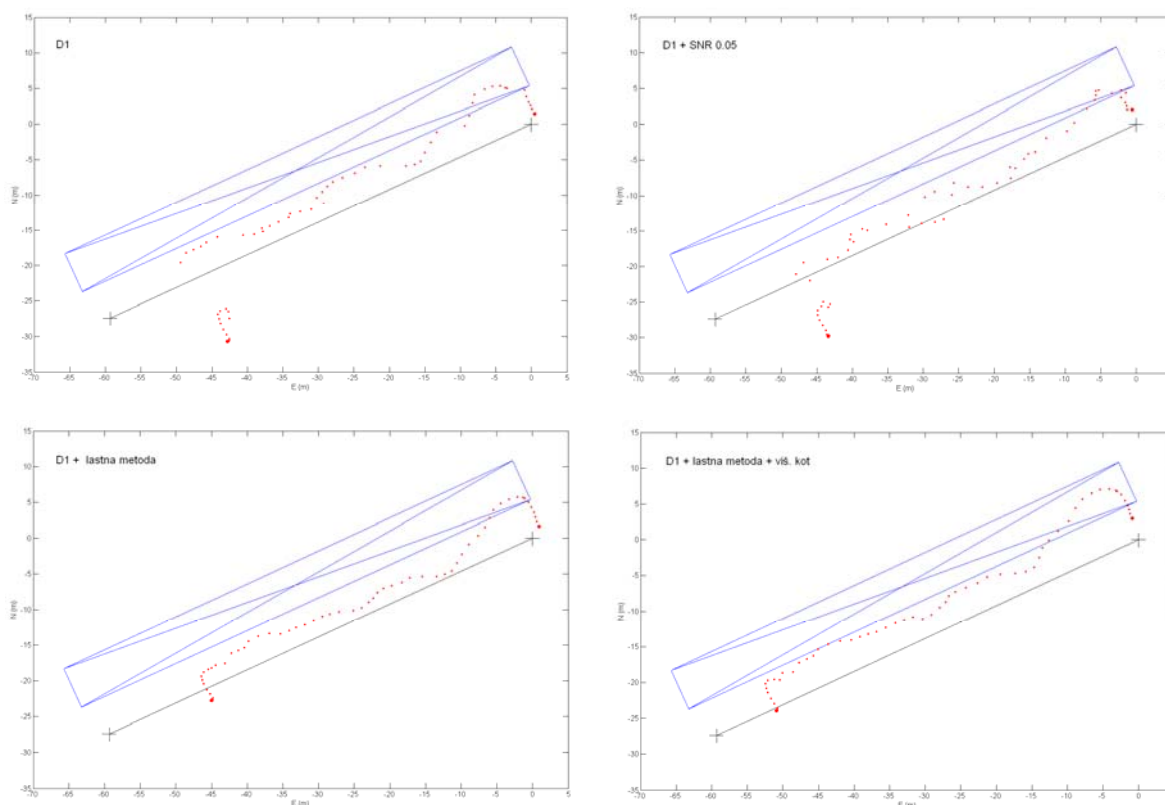
Rezultate obdelave Dopplerjevih opazovanj v oteženih pogojih lahko poizkusimo izboljšati z metodami, ki smo jih predstavili v 4.3. Če upoštevamo modela ionosfere in troposfere, se horizontalne koordinate začetnega položaja za zadnji primer spremenijo za manj kot 1 m. Ker

so modeli atmosfere odvisni predvsem od višinskega kota satelita in časa, se v tako kratkem času popravki spremenijo za zanemarljivo majhno vrednost. Če bi prikazali obe rešitvi, bi videli linearen premik za vrednost razlike začetnih koordinat, ki pa je v tem primeru zelo majhna glede na merilo prikaza.

V obdelavo opazovanj lahko dodatno vključimo poljubno kombinacijo uteži opazovanj po robustni L1-normi, uteži opazovanj glede na višinski kot, uteži opazovanj glede na SNR in lastno razvito metodo. Zaradi preglednosti nismo prikazali vseh možnosti.

V zadnjem primeru utež L1-norme povzroči malo večjo razpršenost položajev, zadnjih 14 položajev pa je nekaj bližje zveznici med krajišči. Utež višinskega kota povzroči zelo malo spremembo. Največja razlika posameznega položaja v eni od komponent je 1,7 m. Rezultati obdelave z utežjo SNR so odvisni od izbranega parametra m . Večja vrednost m pomeni manjše razlike v utežeh. Tako npr. $m = 0,4$ pomeni vrednosti uteži med 0,4 in 0,6, povzroči pa majhne spremembe v položaju, t.j. manj kot 0,5 m po posamezni komponenti, medtem ko npr. $m = 0,05$ za vrednosti uteži med 0,05 in 0,95 povzroči že večje razlike, tudi preko 3 m po posamezni komponenti. Rezultate obdelave z utežjo SNR in vrednostjo za $m = 0,05$ prikazuje slika 4-35 zgoraj desno. Osnova za primerjavo so rezultati obdelave z metodo najmanjših kvadratov brez upoštevanja modelov atmosfere in uteži, ki jih prikazuje slika 4-35 zgoraj levo in je enaka prikazu z rdečimi pikami na sliki 4-34.

Obdelava po lastno razviti metodi na kratko pomeni, da vsem opazovanjem določimo uteži na osnovi robustne L1-norme, od druge epohe naprej ločeno določamo popravek sprejemnikove ure in položaj, po vsaki epohi pa glede na izračunani položaj preračunamo t.i. psevdo razdalje. Detajlni opis določanja položaja s to metodo smo zapisali v 3.3. Rezultati te obdelave so na sliki 4-35 spodaj levo. Kombinacija lastne metode in uteži SNR se ne obnese, prav tako ne kombinacija lastne metode, uteži SNR in uteži višinskega kota. Kombinacija lastne metode in uteži višinskega kota pa izboljša rezultat, kot lahko vidimo na sliki 4-35 spodaj desno.



Slika 4-35: Različni tipi rešitev za Dopplerjeva opazovanja v mešanih pogojih

Fig 4-35: Different solutions for Doppler observations in mixed conditions

Za vse rezultate obdelave Dopplerjevih opazovanj v oteženih pogojih lahko trdimo, da dobro sledijo dejanskemu gibanju sprejemnika, vendar pa se večkrat končni položaji zaključijo pred dejansko zadnjo točko. Pri večini rešitev zadnjega primera je odstopanje zadnje točke od pravega položaja pribl. 15 m, pri najboljši rešitvi pa pribl. 10 m, kar je še vedno veliko, glede na to, da je celotna dolžina izmere nekaj čez 70 m. Tudi rezultati drugih izmer in v drugačnih okoljih kažejo na podobne tendence. Pri opazovanjih v neoviranih pogojih teh težav ni.

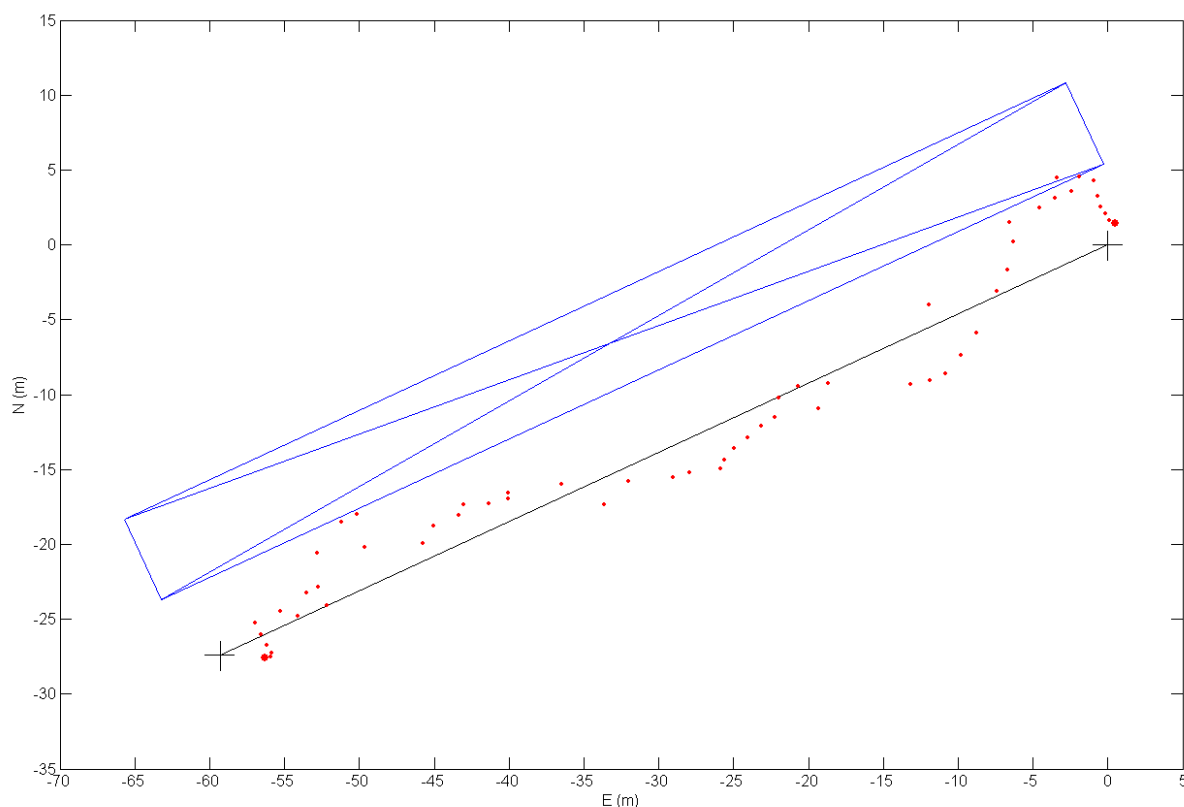
4.4.3 Kombinacija kodnih in Dopplerjevih opazovanj

Pri določitvi položaja lahko upoštevamo tako kodna kot tudi Dopplerjeva opazovanja. Začetni položaj v vsakem primeru določamo samo s kodnimi opazovanj, vsi nadaljnji položaji pa temeljijo na kodnih in Dopplerjevih opazovanjih. Oba tipa opazovanj lahko obravnavamo kot samostojna, lahko pa Dopplerjeva opazovanja uporabimo za filtriranje kodnih opazovanj. V

enem ali drugem primeru moramo smiselno ovrednotiti oba tipa opazovanj, saj lahko v 4.4.1 in 4.4.2 vidimo, da so Dopplerjeva opazovanja precej bolj natančna od kodnih, kljub temu pa še vedno nepopolna v oteženih pogojih.

Kodna in Dopplerjeva opazovanja lahko kombiniramo tako, da slednja služijo za glajenje kodnih opazovanj. Glajenje največkrat poteka s pomočjo t.i. Hatch-filtra po enačbi (2-4). Bistvo filtra je izračun popravljenih vrednosti opazovanj, postopek določitve položaja je nato enak kot za običajna kodna opazovanja.

Slika 4-36 prikazuje rezultate obdelave glajenih opazovanj brez upoštevanja modelov atmosfere in uteži v okolju (ϵ). V primerjavi z najboljšo rešitvijo za Dopplerjeva opazovanja (glej sliko 4-35 spodaj desno) je sicer končni položaj bližje dejanski končni točki, so pa odstopanja vmesnih točk precej večja.



Slika 4-36: Hatch-filter za opazovanja v oteženih pogojih

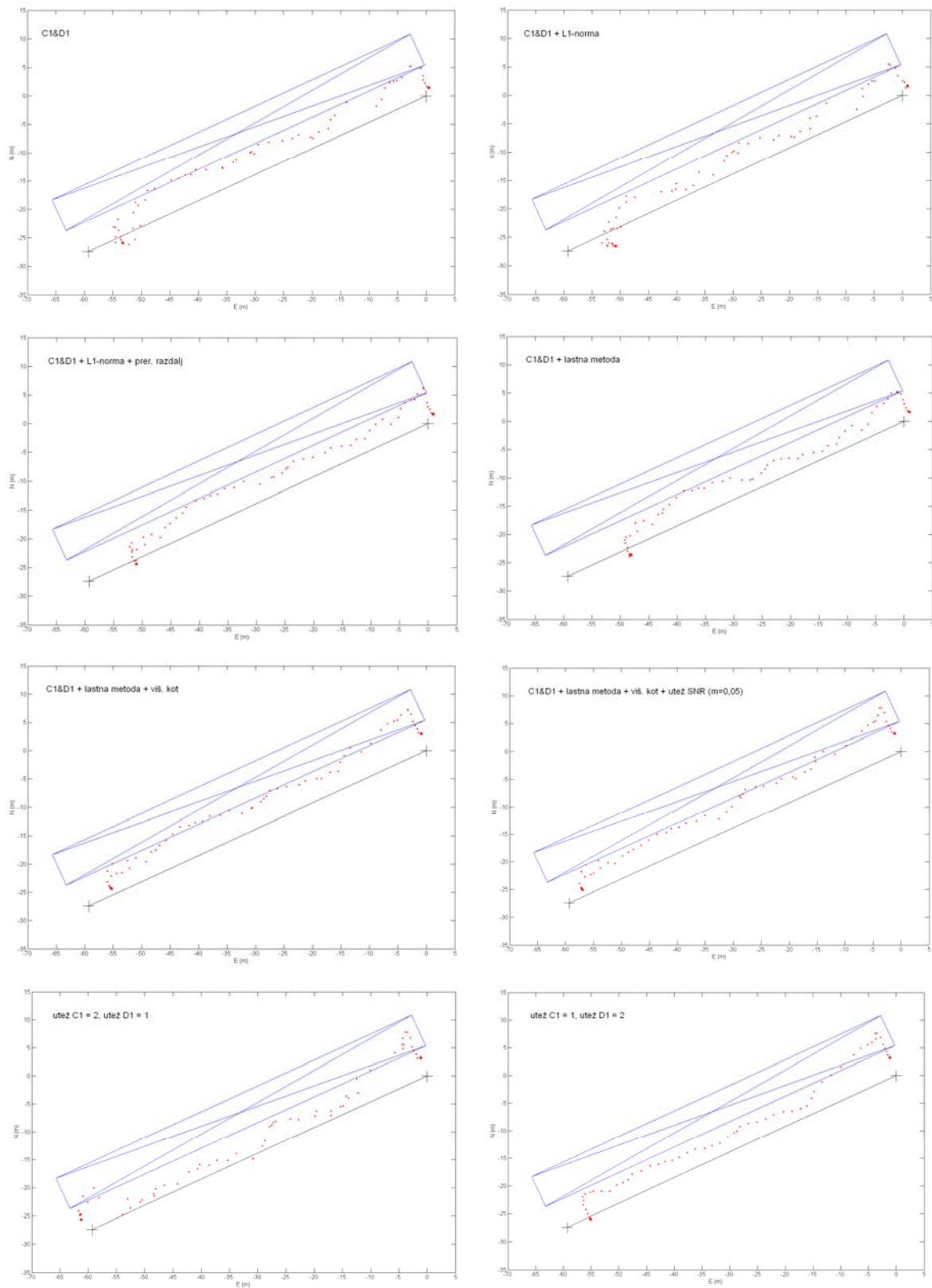
Fig 4-36: Hatch filter for observations in challenging environments

Ker lahko Dopplerjeva opazovanja obravnavamo kot samostojna, jih smemo kot takšna upoštevati v postopku določitve položaja. Število opazovanj se s tem podvoji, imamo pa različne možnosti obravnave podatkov opazovanj. Že v osnovi lahko kodnim in Dopplerjevim opazovanjem dodelimo dodatne uteži s pomočjo robustnih metod, na osnovi višinskega kota in/ali razmerja moči in šuma signala SNR. Nadalje lahko hkrati ali ločeno določamo popravek sprejemnikove ure in položaj. Če je obravnava ločena, lahko v prvi fazi popravek ure določamo z vsemi opazovanji ali samo z enim tipom opazovanj. Seveda pa lahko upoštevamo še modele ionosfere in troposfere.

Namen kombiniranja kodnih in Dopplerjevih opazovanj je pridobitev kakovostne rešitve z obravnavo vseh razpoložljivih podatkov v vseh možnih pogojih, tudi v oteženih pogojih za sprejem signalov s satelitov. Osnovna naloga je torej izboljšanje rezultatov, ki jih nudi obdelava Dopplerjevih opazovanj, kajti ti v oteženih pogojih niso povsem zadovoljivi.

Zgoraj naštetih modeli, metode, uteži in nastavitve ponujajo zelo veliko različnih rešitev. Zaradi preglednosti bomo prikazali samo najbolj značilne.

Slika 4-37 prikazuje različne rešitve obdelave kodnih in Dopplerjevih opazovanj v oteženih pogojih v okolju (e). V 1. vrsti levo z oznako »C1&D1« je prikazana rešitev, kjer smo v obdelavo vključili vsa opazovanja, kodna in Dopplerjeva opazovanja imajo enako utež, drugih uteži pa nismo upoštevali. Izravnava poteka po metodi najmanjših kvadratov. V 1. vrsti desno z oznako »C1&D1 + L1-norma« so rezultati obdelave, ki dodatno upošteva utež opazovanja po robustni metodi L1-norma. Bistvenih razlik med obema rešitvama ni, je pa nedvomno bolj varno opazovanja obdelovati z robustno metodo, saj je precej manj občutljiva na grobe pogoške, kot smo opisali v 3.2 in dokazali v 4.3.4. V pričujočem primeru grobi pogošek verjetno ni prisoten in zato prednosti robustne metode niso očitne. Če npr. rešitev »C1&D1« razširimo z dodatnimi utežmi višinskega kota in/ali utežmi SNR, je razlika med rešitvami zelo majhna.



Slika 4-37: Različni tipi rešitev v mešanih pogojih v okolju (e)

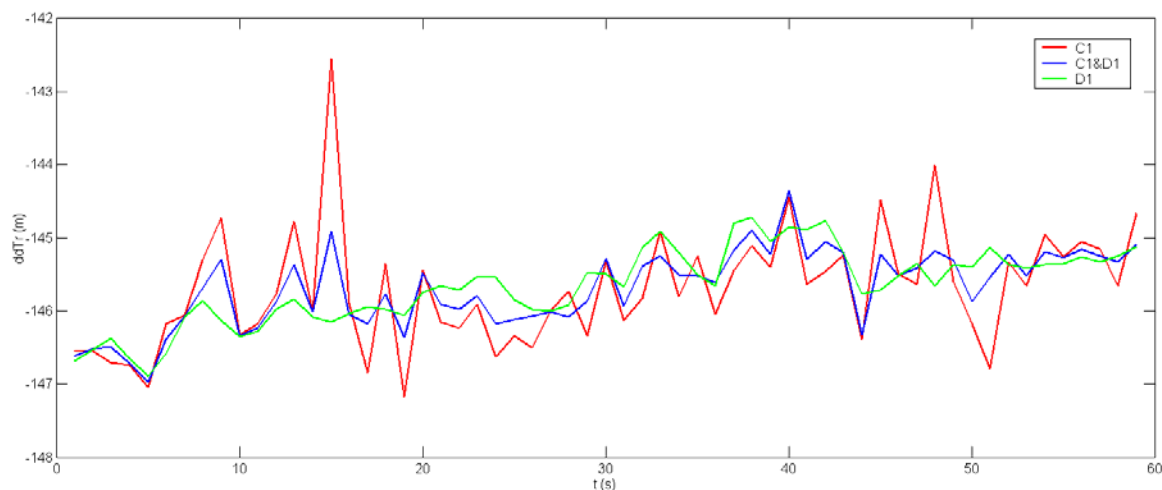
Fig 4-37: Different solutions in mixed conditions in environment (e)

Ena poglavitnih značilnosti lastno razvite metode obdelave je preračun razdalj med sprejemnikom in sateliti po vsaki epohi. Glede na izračunani trenutni položaj točke izračunamo geometrijske razdalje do satelitov, v naslednji epohi pa te razdalje spremenimo za razliko psevdo razdalj oz. za srednjo vrednost Dopplerjeve frekvence med obema epohama. Detajlni opis postopka podajamo v 3.3. Način obdelave s pravimi razdaljami tudi pomeni, da v izračun podatkov nadaljnjih epoh ne vključimo atmosferskih modelov. Strogo gledano bi morali upoštevati spremembe atmosferskih popravkov v času, ki pa so za kratke izmere zanemarljivo majhne. Rešitev »C1&D1 + L1-norma«, ki smo jo nadgradili z omenjenim postopkom, je prikazana na sliki 4-37 v 2. vrsti levo z oznako »C1&D1 + L1-norma + prer. razdalj«. Položaji točk si sledijo bolj zvezno kot v predhodnih rešitvah in so bližje dejanski trajektoriji gibanja.

Druga bistvena značilnost lastno razvite metode je ločena obravnava popravka urinega stanja sprejemnikove ure dTr in položaja. V prvi fazi določamo samo dTr , v drugi fazi pa samo položaj točke. Tak postopek omogoča, da za izračun dTr uporabimo poljuben tip opazovanj. Slika 4-38 prikazuje vse tri možnosti, z rdečo so označene vrednosti dTr , ki jih dobimo s kodnimi opazovanji, z modro barvo so označene vrednosti, ki jih pridobimo z vsemi opazovanji, z zeleno barvo pa vrednosti, ki jih izračunamo samo iz Dopplerjevih opazovanj. Grafikon slednjih je najbolj gladek, kar smo pričakovali glede na izkušnje iz predhodnih primerov v tem poglavju. Če dTr določamo samo iz kodnih opazovanj, so na grafikonu popravkov značilne »špice«, vidne tudi na sliki 4-38, imajo pa relativno majhne amplitude, največja ima odmik približno 3 m. Ker je v splošnem določitev dTr na osnovi Dopplerjevih opazovanj najbolj »gladka«, v lastno razviti metodi določamo popravek sprejemnikove ure na ta način. Postopek preračuna razdalj po vsaki obdelani epohi nastavi vrednost dTr na 0, kar pomeni, da izračunane vrednosti za dTr v vsaki epohi predstavljajo spremembo popravka sprejemnikove ure.

Tretja značilnost lastno razvite metode je določitev uteži opazovanj z robustno metodo L1-norma. V prvi iteraciji poteka izravnava po metodi najmanjših kvadratov, v naslednjih pa opazovanjem dodelimo ustrezne uteži glede na velikosti v vektorju popravkov. Rešitev lastno

razvite metode z osnovnimi parametri (enaka utež kodnih in Dopplerjevih opazovanj) je prikazana na sliki 4-37 v 2. vrsti desno, ima pa oznako »C1&D1 + lastna metoda«.



Slika 4-38: Grafikon sprememb popravkov sprejemnikove ure v ločeni obdelavi

Fig 4-38: Variations of receiver clock offset estimates in separate processing

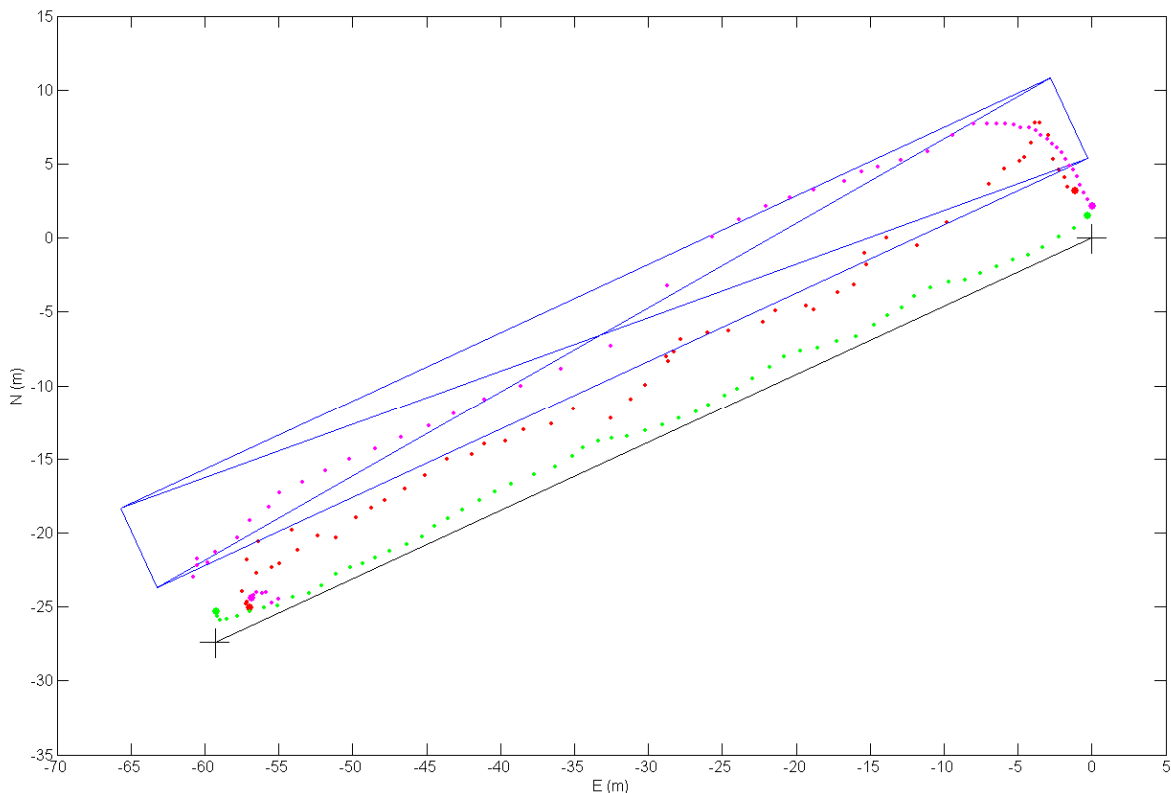
V obdelavo lahko vključimo še dodatne uteži. Čeprav je uporaba uteži višinskega kota v oteženih pogojih vprašljiva (glej 2.7.7) in se pri kodnih opazovanjih tudi dejansko izkaže kot nekoristno (npr. sliki 4-15 in 4-16), se v tem kompleksnem modelu izkaže kot smiselno, kar kaže slika 4-37 v 3. vrsti levo z oznako »C1&D1 + lastna metoda + viš. kot«. Začetni položaj se sicer malenkost premakne, vendar pa je večina položajev bližje dejanski trajektoriji, zadnji položaj pa se za 7 m približa dejanski zadnji točki.

Velikost uteži opazovanja glede na SNR je odvisna od izbire parametra m . Manjša izbrana vrednost pomeni večji vpliv uteži. Tudi vrednost $m = 0,05$ v tem primeru ne povzroči velike spremembe v rezultatih, zadnji položaj pa se za 1,7 m približa končni točki.

V postopku obdelave lahko variiramo uteži tipov opazovanj. Osnovna nastavitvev je enaka utež za kodna in Dopplerjeva opazovanja. Če povečamo uteži kodnih opazovanj, so položaji bolj razpršeni, kot lahko vidimo na sliki 4-37 v spodnji vrsti levo. Utež kodnih opazovanj je v tem primeru dvakrat večja od Dopplerjevih. V pričujočem primeru je razdalja med prvo in zadnjo točko sicer podobna dejanski razdalji med skrajnima točkama, imajo pa vmesne točke večja odstopanja, tudi čez 5 m. Če povečamo utež Dopplerjevih opazovanj, si položaji sledijo bolj

gladko, po drugi strani pa se povečuje vpliv t.i. krčenja Dopplerjevih opazovanj v oteženih pogojih. Prikaz obdelave z dvojno utežjo Dopplerjevih opazovanj glede na kodna opazovanja je na sliki 4-37 v spodnji vrsti desno.

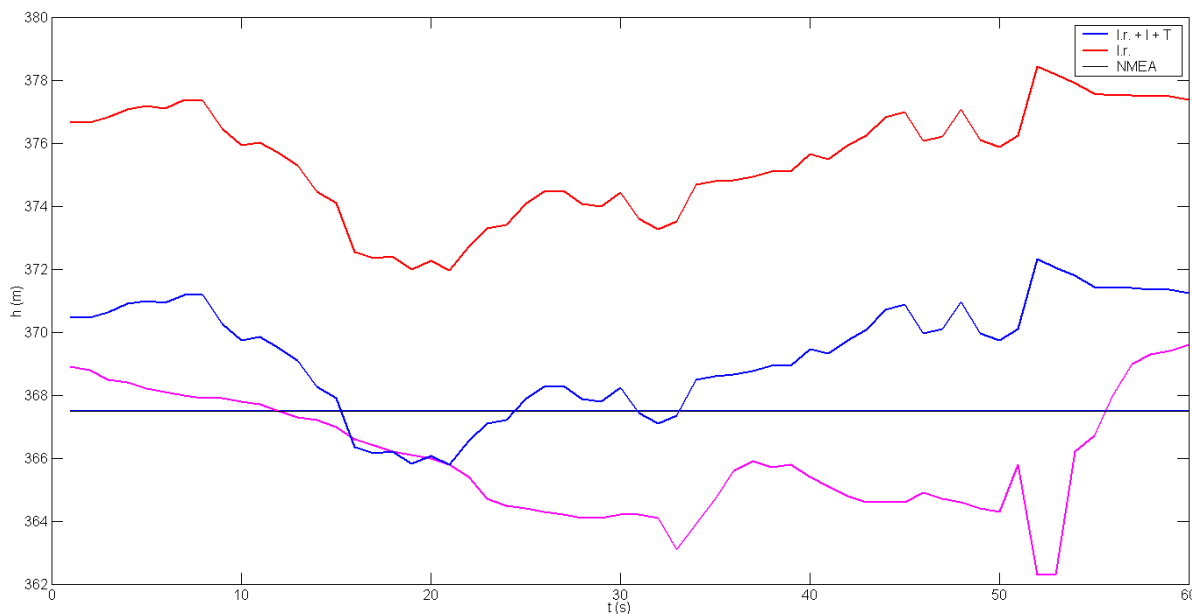
Najboljšo rešitev v tem primeru smo pridobili z obdelavo kodnih in Dopplerjevih opazovanj z lastno razvito metodo, upoštevanjem uteži višinskega kota in uteži SNR s parametrom $m = 0,05$. Kodna in Dopplerjeva opazovanja imajo enako utež. Položaji končne rešitve so na sliki 4-39 prikazani z rdečo barvo. Za primerjavo so z vijolično barvo prikazani položaji interne rešitve sprejemnika, ki smo jih prebrali iz sporočil NMEA in pretvorili v enotno projekcijsko ravnino. Na začetku meritve si interno določeni položaji sledijo zelo na blizu, potem so razdalje večje. Dejanska hitrost hoje je bila dokaj konstantna. Z zeleno barvo so označeni položaji obdelave direktne izmere med skrajnima točkama. Postopek obdelave je enak kot pri izmeri, ki je večinoma potekala pod nadstrešnico. Metoda, ki se izkaže za najboljšo v oteženih pogojih, mora namreč suvereno delovati tudi v neoviranih pogojih.



Slika 4-39: Primerjava končne in interne rešitve v okolju (e)

Fig 4-39: Comparison of final and internal solutions in environment (e)

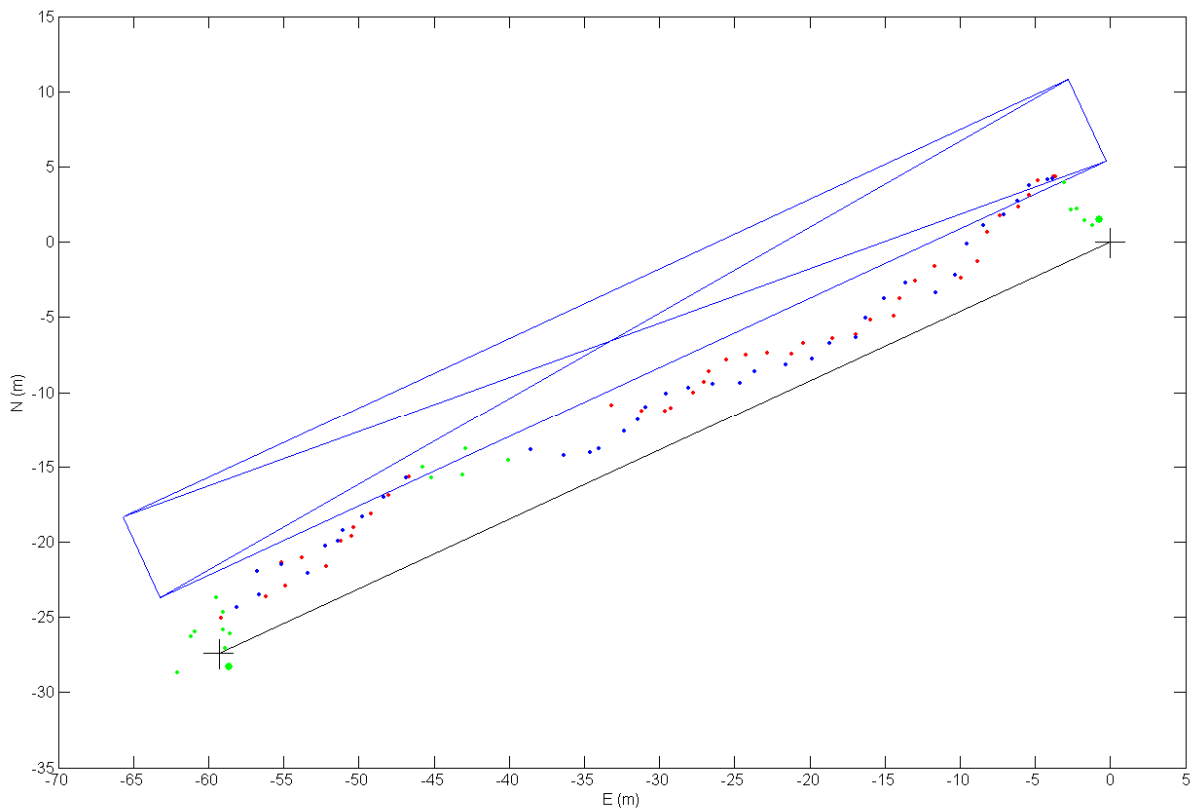
V višinski komponenti je vpliv modelov atmosfere večji kot pri horizontalnih komponentah. Horizontalni položaj se ob upoštevanju popravkov modelov atmosfere razlikuje za 20 cm, po višini pa pribl. 6 m. Primerjavo višin za zgoraj obravnavani primer prikazuje slika 4-40. Višine brez upoštevanja atmosferskih popravkov so prikazane z rdečo barvo, višine z upoštevanjem modela ionosfere (Klobuchar) in troposfere (Hopfield + Niell) z modro barvo, medtem ko so višine interne rešitve sprejemnika označene z vijolično barvo.



Slika 4-40: Primerjava višin končne in interne rešitve v okolju (e)

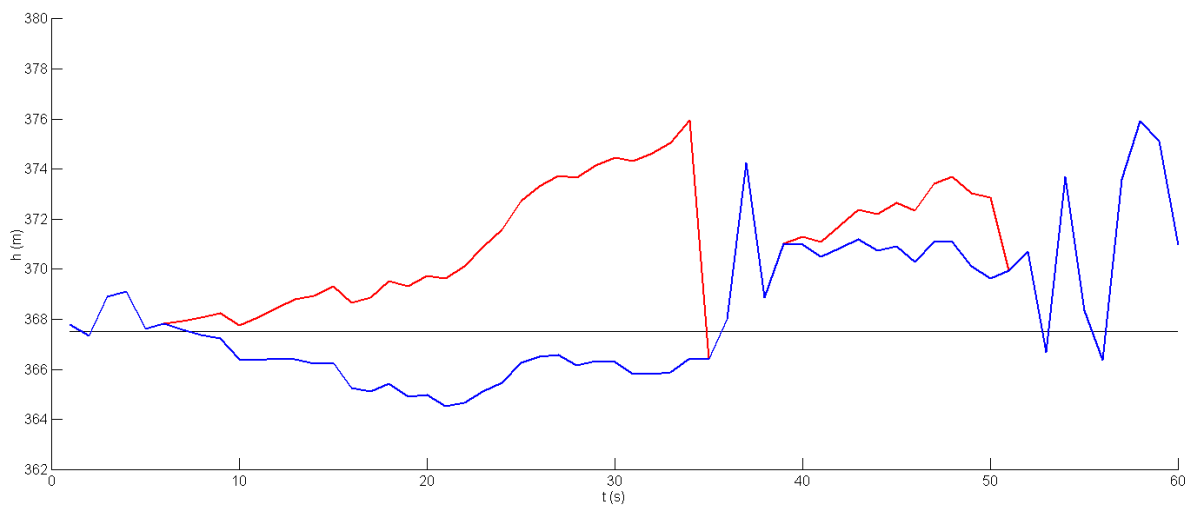
Fig 4-40: Comparison of heights in final and internal solutions in environment (e)

Slika 4-41 prikazuje položaje, izračunane s pogojnim DGPS, ki smo ga opisali v 3.3.3. Če so izpolnjeni pogoji za DGPS, t.j. vsaj 6 signalov z vrednostjo SNR 35 ali več, so položaji določeni z DGPS, drugače pa z lastno metodo obdelave kodnih in Dopplerjevih opazovanj. Položaji DGPS so prikazani z zeleno barvo, ostali pa z rdečo barvo. Iz odstopanj položajev obeh metod v epohah, kjer je ponovno možno izvesti DGPS, smo glede na časovni kriterij proporcionalno izračunali popravke. Na ta način popravljene položaji so označeni z modrimi pikami. V obdelavi nismo upoštevali uteži višinskega kota in SNR ter modelov atmosfere.



Slika 4-41: Pogojni DGPS v okolju (e)

Fig 4-41: Conditional DGPS in environment (e)



Slika 4-42: Primerjava višin pogojnega DGPS v okolju (e)

Fig 4-42: Comparison of heights in conditional DGPS in environment (e)

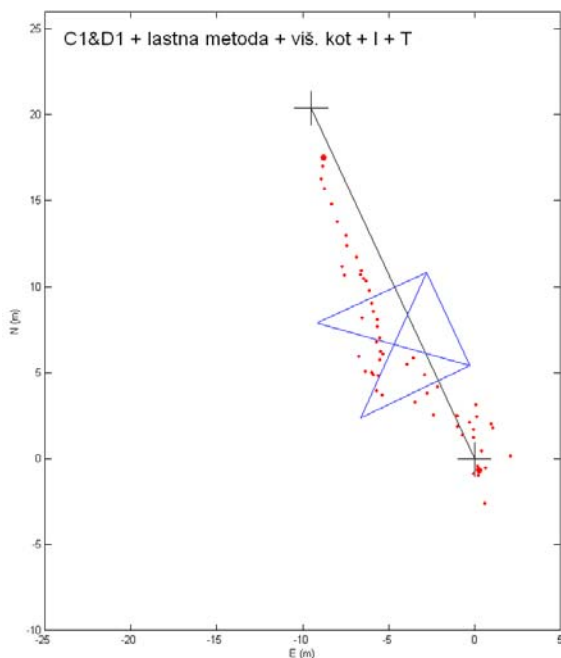
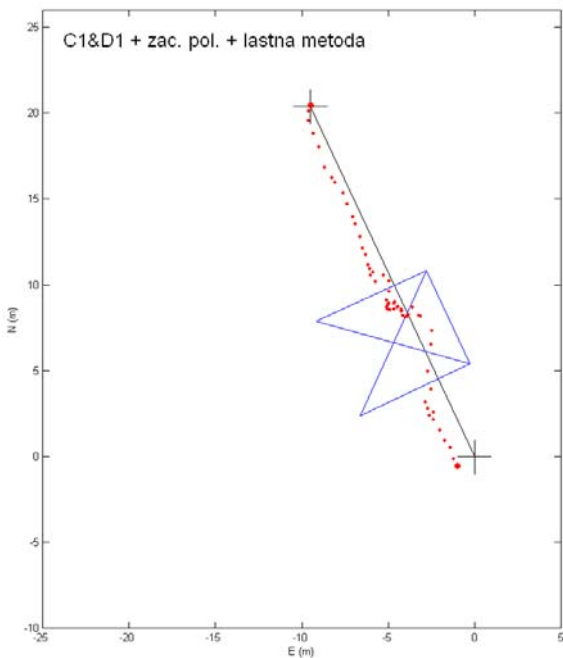
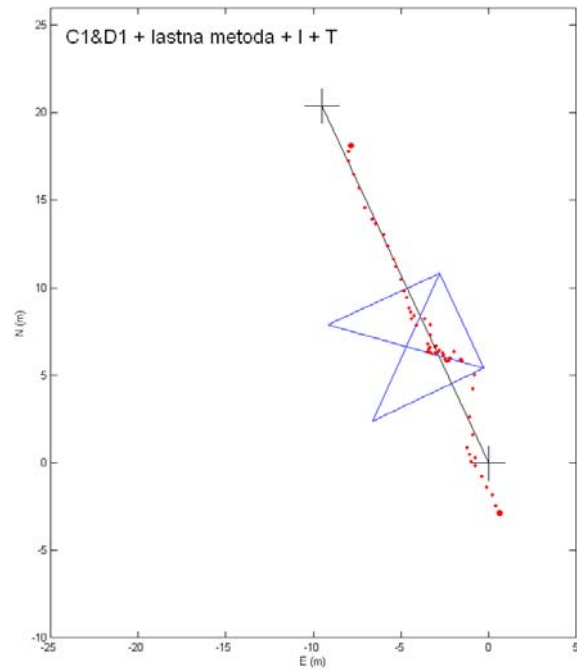
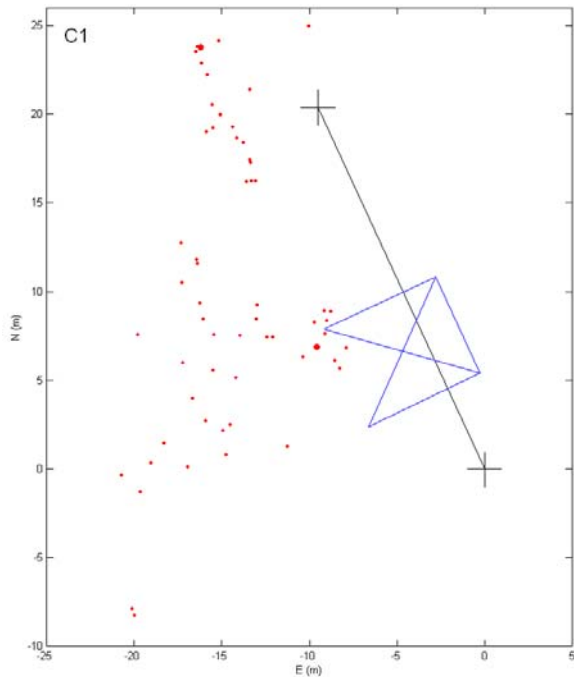
Slika 4-42 predstavlja primerjavo višin obeh načinov določitve položaja. Z rdečo barvo so prikazane višine, določene z DGPS ali z lastno metodo, z modro pa višine, določene z DGPS ali s porazdelitvijo odstopanja v epohah, kjer DGPS ni možen. Višine v epohah, za katere je na grafikonu prikazana samo modra barva, so določene z DGPS. Interpolirane vrednosti so vidno bližje pravim vrednostim. Proti koncu izmere pa lahko vidimo, da nastopijo večja odstopanja v višinah, četudi so določena z DGPS. Razlike v višinah med sosednjimi epohami so tudi 7 metrov. Nedvomno je horizontalna točnost DGPS-položajev višja kot višinska, kar pa je tudi pričakovano.

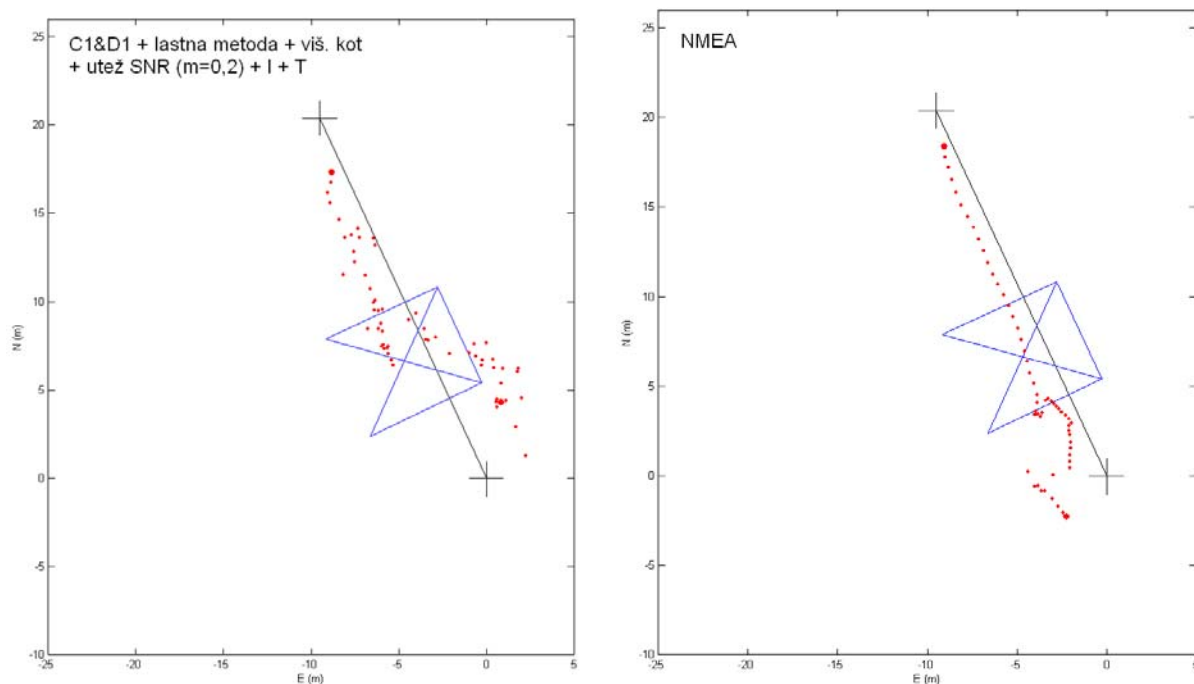
Postopke obdelave smo preverili tudi na drugem primeru v mešanih pogojih, in sicer v okolju (d). Izmero smo pričeli na odprtem območju, vmes smo pribl. 25 s stali pod nadstrešnico, izmero pa zaključili na odprtem območju.

Slika 4-43 prikazuje različne tipe rešitev v okolju (d). Vse možne rešitve zaradi preglednosti niso prikazane. V 1. vrsti levo so prikazani položaji, ki smo jih določili s kodnimi opazovanji brez upoštevanja modelov atmosfere in uteži. Na desni strani so rezultati obdelave kodnih in Dopplerjevih opazovanj z lastno metodo in z upoštevanjem modelov atmosfere. Atmosferski popravki premaknejo horizontalni položaj za 2,1 m, višino pa prestavijo zelo blizu prave vrednosti. Višine točk brez upoštevanja modelov atmosfere so pribl. 20 m previsoke. Če pri lastni metodi predpostavimo, da poznamo začetni položaj, dobimo rešitev, prikazano v 2. vrsti levo. Med vsemi rešitvami je ta najboljša, seveda pa temelji na predpostavki, ki v praksi ni izvedljiva.

Če lastni metodi in modelom atmosfere dodamo še utež višinskega kota, dobimo rešitev v 2. vrsti desno. Utež SNR v tem primeru učinkuje drugače kot v predhodnem primeru, kjer ni povzročal velikih sprememb. Na sliki v 3. vrstici levo vidimo, da v tem primeru utež SNR, čeprav tudi z večjimi vrednostmi za m , povzroči večje spremembe, še posebej v drugem delu izmere, ki je prikazan v spodnjem delu grafikona. Za primerjavo je v 3. vrsti desno prikaz interne rešitve iz sporočil NMEA. Očitno je, da ima interni algoritem vgrajene močne filtre, saj si v prvem delu položaji lepo sledijo, tudi pod nadstrešnico. Vendar pa rešitev dejanske situacije ne prikazuje povsem ustrezno. Nekje na sredini nadstrešnice bi moralo biti 20-25 položajev, pri tej rešitvi pa je gruča točk prikazana na odprtem območju. Najboljša lastna

rešitev tega primera je obdelava kodnih in Dopplerjevih opazovanj z lastno razvito metodo in upoštevanjem modelov ionosfere in troposfere. Slednji pripomorejo predvsem k izboljšanju točnosti višinske komponente.

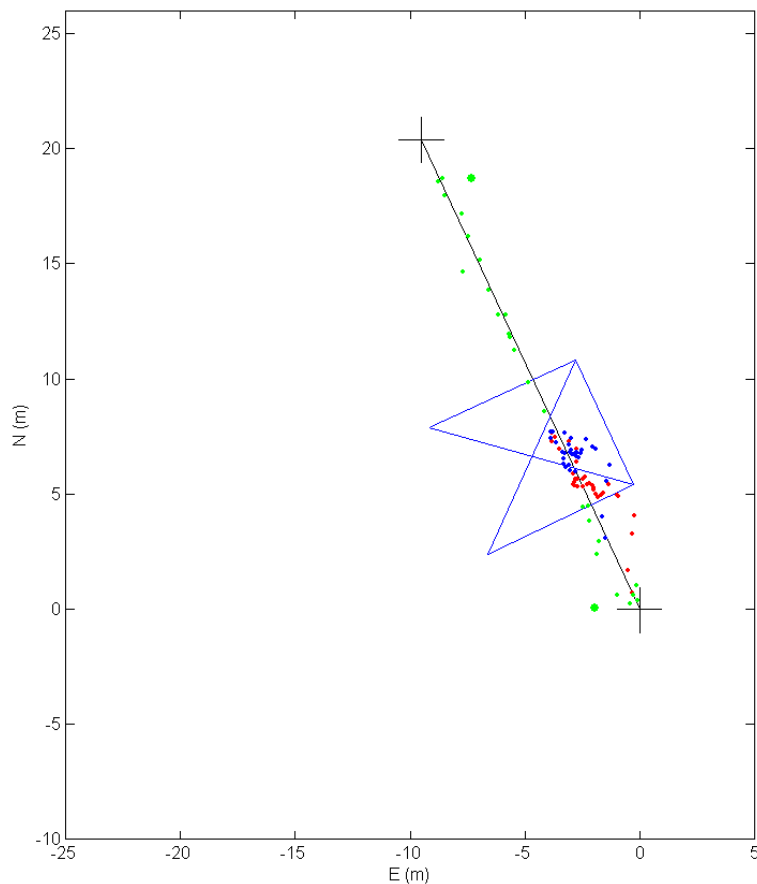




Slika 4-43: Različni tipi rešitev v mešanih pogojih v okolju (d)

Fig 4-43: Different solutions in mixed conditions in environment (d)

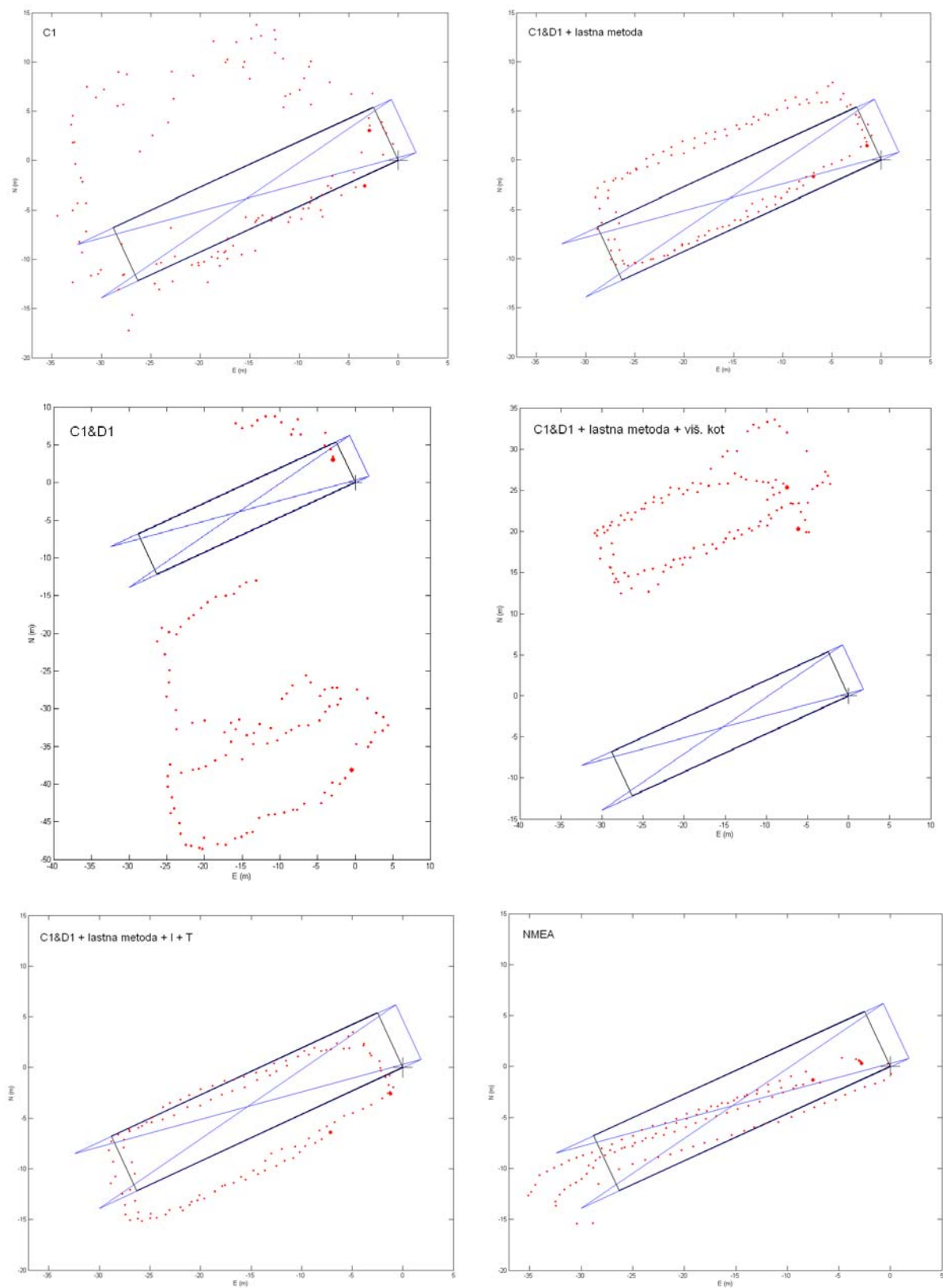
Glede na to, da sta začetek in konec izmere opravljena na dokaj odprtem območju, lahko s pridom uporabimo pogojni DGPS. Rezultate tega načina obdelave prikazuje slika 4-44. Z zeleno barvo so prikazani položaji, določeni z DGPS, z rdečo barvo so prikazani položaji, izračunani z lastno metodo, kadar pogojni DGPS ni možen, z modro barvo pa so prikazani položaji, dobljeni s porazdelitvijo odstopanja na prvi točki spodnjega dela izmere, ko je bilo možno ponovno izvesti DGPS. Gruča modrih pik pod nadstrešnico dobro prikazuje dejanske položaje, saj smo izmero izvedli tako, da smo tam stali okoli 25 epoh. Odstopanja položajev od dejanskih položajev, pridobljenih z DGPS ali tudi lastno metodo, so znotraj treh metrov.



Slika 4-44: Pogojni DGPS v okolju (d)

Fig 4-44: Conditional DGPS in environment (d)

Tretji kinematični primer predstavlja izmero v okolju (f) v stalnih oteženih pogojih, saj se leta stalno izvaja pod nadstrešnico. Število sprejetih signalov je podobno kot na odprtem območju, je pa prisotnost pogreška večpotja nedvomno velika, saj je v neposredni bližini veliko betonskih in kovinskih površin ter več zunanjih klimatskih enot. Določen delež signalov je zaradi prehoda skozi ovire tudi oslavljen. Značilne rešitve te izmere prikazuje slika 4-45. Oznake rešitev so enake kot v predhodnih primerih. Z znakom »+« je označena začetna in končna točka. Modri lik nakazuje položaj nadstrešnice, črn pravokotnik pa ponazarja trajektorijo gibanja.

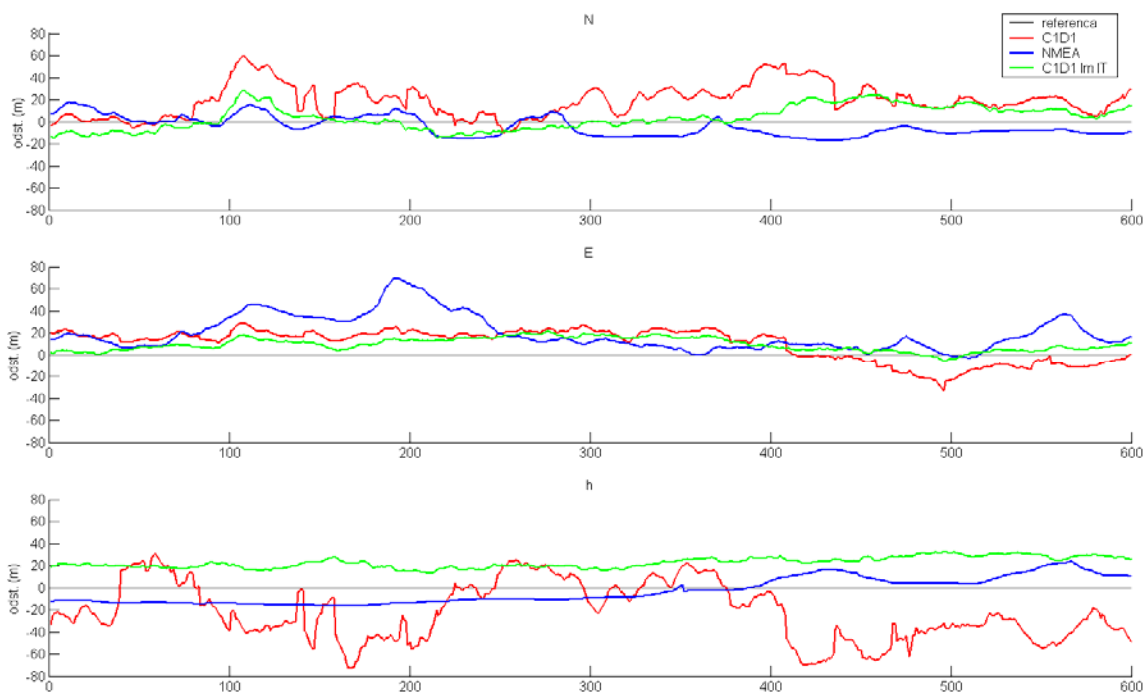


Slika 4-45: Različni tipi rešitev v oteženih pogojih v okolju (f)

Fig 4-45: Different solutions in challenging environment (f)

Zanimiva sta primera rešitev v drugi vrsti slike 4-45. Pri običajni obdelavi kodnih in Dopplerjevih opazovanj pride po nekaj epohah do velike spremembe v položaju. Pri lastno razviti metodi teh sprememb ni, položaji pa dobro, z majhnimi odstopanji sledijo liniji gibanja. Če v ta način obdelave vključimo utež višinskega kota, se celotna rešitev premakne za skoraj 20 m proti severu, višina pa se zmanjša za pribl. 60 m. Upoštevanje uteži SNR v nobenem primeru ne povzroči velikih razlik. Ko lastni metodi obdelave dodamo še modele atmosfere, pride do premika v ravnini za pribl. 4 m v smeri juga, večja pa je razlika v višini, ki se zniža za pribl. 36 m. Te višine so povprečno 5 m nižje od pravih, medtem ko so višine brez upoštevanja atmosferskih popravkov za pribl. 30 m previsoke. Za primerjavo smo vključili prikaz interne rešitve NMEA, ki ima težave slediti pravi liniji gibanja.

Celotno izmero v okolju (f) smo opravili v oteženih pogojih. V izmeri samo ena epoha od skupaj 120-ih izpolnjuje pogoje za pogojni DGPS, pa še ta položaj je zelo blizu položaju, dobljenem z lastno metodo. V takih primerih ni smiselno izvajati obdelave s pogojnim DGPS.

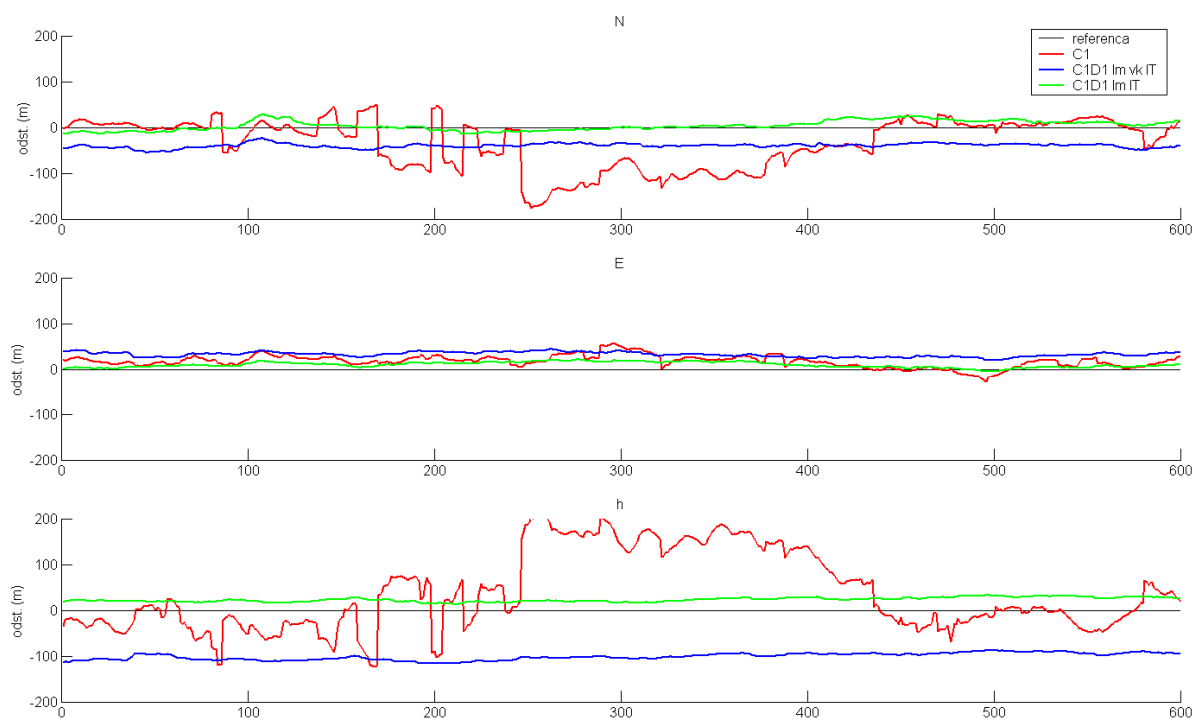


Slika 4-46: Primerjava rešitev znotraj objekta v večjem merilu

Fig 4-46: Comparison of indoor solutions in larger scale

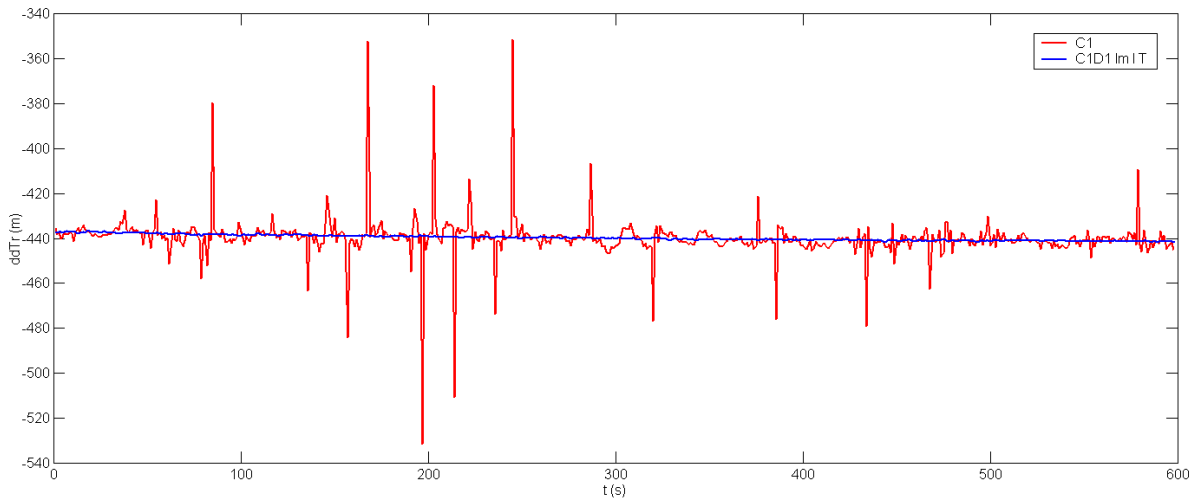
Zadnji obravnavani primer je statično opazovanje znotraj objekta. Slika 4-46 v večjem merilu prikazuje nekaj metod, ki dajejo dobre rezultate. Z rdečo barvo je prikazana rešitev »C1D1«, ki pomeni običajno obdelavo kodnih in Dopplerjevih opazovanj. Z modro barvo je označena interna rešitev »NMEA«, z zeleno pa najboljša lastna rešitev »C1D1 lm IT«, ki je rezultat lastno razvite metode obdelave kodnih in Dopplerjevih opazovanj z upoštevanjem modelov ionosfere in troposfere.

V tem primeru upoštevanje višinskega kota zelo poslabša rešitev, kar lahko vidimo na sliki 4-47. Za primerjavo je z zeleno barvo prikazana ista rešitev kot na prejšnji sliki. Če tej rešitvi dodamo še utež višinskega kota, dobimo položaje, označene z modro barvo. Višina točk se spremeni za več kot 100 m! Utež SNR prav tako poslabša rezultate lastno razvite metode, vendar precej manj kot utež višinskega kota. Z rdečo barvo je označena osnovna rešitev, t.j. obdelava kodnih opazovanj brez upoštevanja modelov in uteži. Razlika med najslabšo in najboljšo rešitvijo je ogromna, saj so razlike med posameznimi položaji tudi več kot 200 m. Razlika je zelo očitna tudi pri določitvi popravka sprejemnikove ure pri osnovni rešitvi »C1« in pri najboljši lastni rešitvi, kot lahko vidimo na sliki 4-48.



Slika 4-47: Primerjava rešitev znotraj objekta v manjšem merilu

Fig 4-47: Comparison of indoor solutions in smaller scale



Slika 4-48: Spremembe sprejemnikove ure v najslabši in v najboljši rešitvi znotraj objekta
Fig 4-48: Variations of receiver clock offset estimates for the worst and the best solution inside the building

V tem primeru poznamo referenčne koordinate točke in lahko za posamezne rešitve izračunamo osnovne statistične vrednosti. Preglednica 4-2 prikazuje osnovno statistiko za najbolj značilne rešitve. Rešitev z upoštevanjem uteži višinskega kota je zaradi velikih odstopanj izvzeta iz statističnega pregleda. Oznake rešitev so enake kot na grafičnih prikazih.

V preglednici so po komponentah navedene naslednje vrednosti:

- min: najmanjša vrednost odstopanja od prave vrednosti,
- max: največja vrednost odstopanja od prave vrednosti,
- sr.vr.: srednja vrednost odstopanja od prave vrednosti,
- st.odk.: standardni odklon in
- RMS: srednji kvadratni pogrešek (angl. Root Mean Square).

Vse številčne vrednosti v preglednici so izražene v metrih. Standardni odklon se nanaša na razpršenost vrednosti okoli srednje vrednosti, medtem ko se RMS nanaša na odstopanja od prave vrednosti. Standardni odklon je torej mera natančnosti, RMS pa mera točnosti. Najboljša lastna rešitev ima npr. standardni odklon po višinski komponenti 4,8 m, ker pa se vse višine gibljejo okoli 20 m nad referenčno vrednostjo, je RMS 23,2 m. Statistično sta najboljše lastna rešitev in interna rešitev dokaj podobni, izstopa pa odstopanje interne rešitve

v komponenti E, ki doseže 70 m. Posledično se v tej komponenti povečata standardni odklon in RMS.

Preglednica 4-2: Statistične vrednosti značilnih rešitev znotraj objekta

Table 4-2: Statistical values of typical solutions indoors

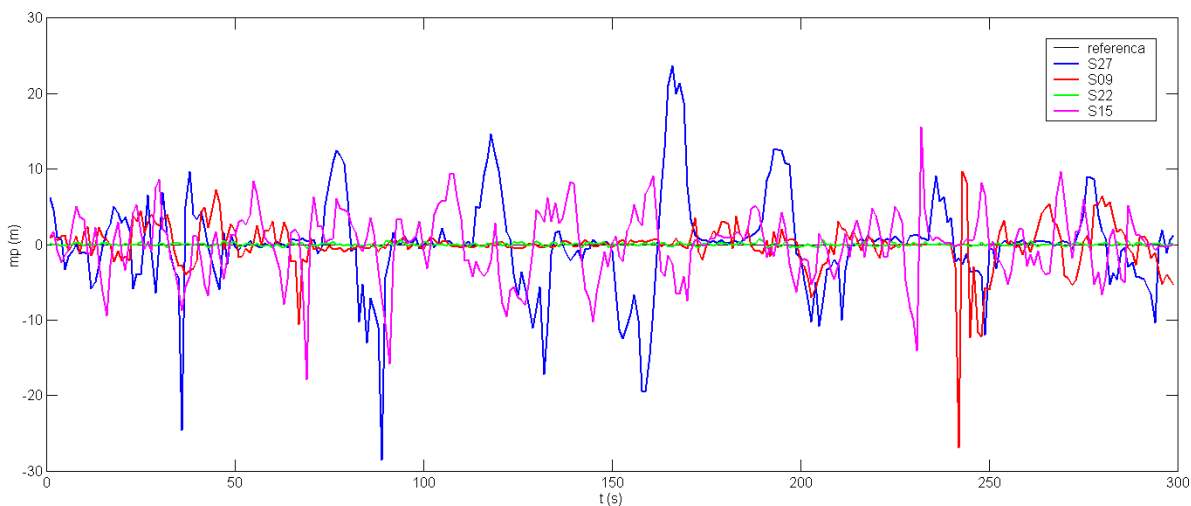
		C1	C1D1	C1D1 lm IT	NMEA
N	min	-175,8	-10,2	-14,5	-17,2
	max	49,1	60,1	29,0	17,6
	sr.vr.	-34,0	19,2	3,5	-4,5
	st.odk.	53,2	14,7	10,5	8,8
	RMS	63,1	24,2	11,1	9,9
E	min	-29,3	-32,8	-5,4	-3,0
	max	55,5	28,6	21,4	69,8
	sr.vr.	17,0	9,7	9,3	19,5
	st.odk.	13,3	14,4	6,0	15,9
	RMS	21,6	17,3	11,1	25,1
h	min	-124,0	-72,9	12,9	-16,3
	max	206,2	31,0	32,4	23,8
	sr.vr.	36,4	-21,9	22,7	-3,6
	st.odk.	84,8	26,0	4,8	11,5
	RMS	92,2	34,0	23,2	12,0

4.5 Ocena vpliva večpotja na kodna opazovanja

Pogrešek večpotja oz. »multipath«, ki je posledica enkratnega ali večkratnega odboja signala, preden ga zazna antena, je nasploh najbolj moteč pogrešek pri opazovanjih GPS, še posebej pa pri kinematičnih izmerah, saj ima značilnosti sistematičnega pogreška. Pri določitvi položaja v oteženih pogojih ima ta pogrešek nedvomno največji vpliv na opazovanja. Kot smo navedli v 2.2, je vpliv pogreška na kodna opazovanja lahko zelo velik, medtem ko je vpliv na fazna in Dopplerjeva opazovanja majhen. Dopplerjeva opazovanja naj bi bila po nekaterih ocenah celo neobčutljiva na pogrešek večpotja.

Vpliv pogreška večpotja na kodna opazovanja lahko potemtakem ocenimo iz razlik kodnih in Dopplerjevih opazovanj. Tako dobljene razlike lahko sicer vsebujejo še druge nemodelirane pogreške, npr. šum sprejemnika, ki pa so vsi za več stopenj manjši od večpotja in zato lahko predpostavimo, da velika večina razlike pripada pogrešku večpotja.

Slika 4-49 prikazuje ocene vrednosti pogreška večpotja za kodna opazovanja na primeru statičnega opazovanja pod nadstrešnico v neposredni bližini klimatske naprave. V posamezni epohi opazovanj je sicer do 11 opazovanj s satelitov. Zaradi preglednosti so prikazane vrednosti samo za najbolj značilne pojave, kar pomeni 3 satelite z večjimi vrednostmi in 1 satelit z majhnimi vrednostmi vpliva večpotja. Vrednosti za satelit S27 segajo med -28 in +23 m, za satelit S09 med -27 in +10 m, za satelit S15 med -18 in +16 m, medtem ko so vrednosti za satelit S22 med -0.5 in +0.7 m. Za prve tri navedene satelite so vrednosti zaokrožene na cel meter. Glede na vrednosti za satelit S22 lahko sklepamo, da je bil signal s tega satelita vedno sprejet neposredno, torej brez predhodnega odboja, ali pa je vpliv odboja neznamen. V splošnem pa lahko pogrešek večpotja ocenimo kot zelo »divjji«, saj se lahko za posamezen satelit v 5 minutah spremeni za več kot 50 m!

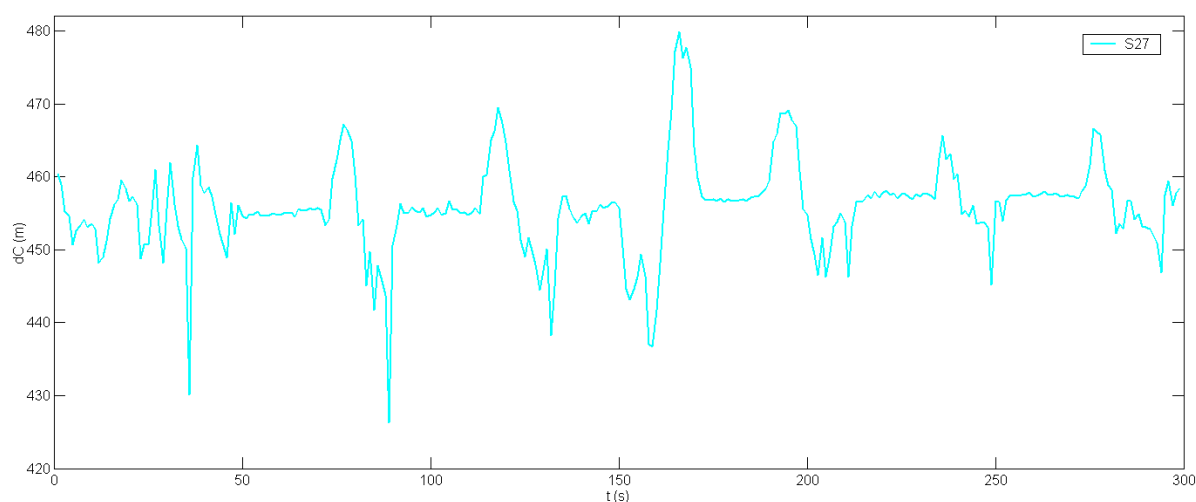


Slika 4-49: Ocena pogreška večpotja z Dopplerjevimi opazovanji

Fig 4-49: Multipath estimation with Doppler observations

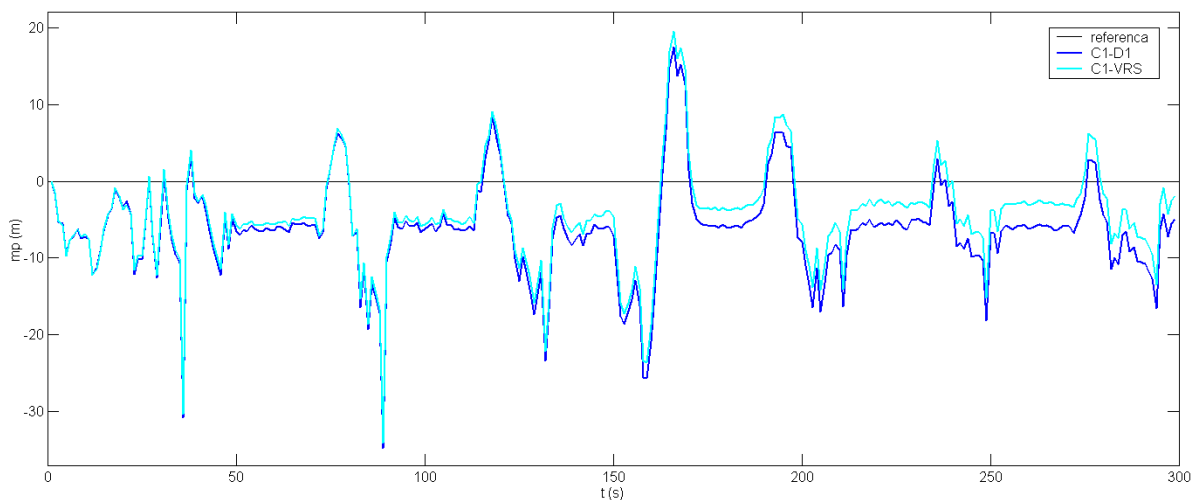
Pogrešek večpotja lahko ocenimo tudi s pomočjo t.i. navidezne referenčne postaje VRS. Podatke VRS lahko tvorimo za poljuben položaj na osnovi podatkov več trajno delujočih

postaj GPS. Podatke lahko pridobimo v resničnem času ali naknadno preko spleta. Navidezni podatki opazovanj so običajno izračunani tako, da ne vsebujejo pogreška sprejemnikove ure, kot se je izkazalo tudi pri obdelavi tovrstnih podatkov. Bolj pomembno pa je, da ti podatki ne vsebujejo pogreška večpotja. Ta opazovanja so torej lahko nedvomno dobra referenca za oceno pogreška večpotja. Če tvorimo spremembe opazovanih kodnih psevdo razdalj C1 in spremembe navideznih psevdo razdalj C1 ter izračunamo medsebojno razliko, dobimo za satelit S27 grafikon, kot ga prikazuje slika 4-50. Grafikon je po obliki zelo podoben grafikonu za isti satelit v modri barvi na sliki 4-49, razlika v navpični osi pa nastopi ravno zaradi urinega stanja sprejemnikove ure. Tu gre namreč za primerjavo surovih opazovanj in popravek sprejemnikove ure za dejanska opazovanja ni določen. Če oba grafikona spravimo na začetno vrednost 0, dobimo primerjavo obeh rešitev, ki jo prikazuje slika 4-51. Grafikona, še posebej na začetku, skoraj povsem sovpadata, se pa sčasoma razhajata, kar je posledica drsenja oz. »drifta« sprejemnikove ure, ki seveda tu ni določen.



Slika 4-50: Ocena pogreška večpotja z opazovanji VRS

Fig 4-50: Multipath estimation with VRS



Slika 4-51: Primerjava ocen večpotja z Dopplerjevimi opazovanji in VRS

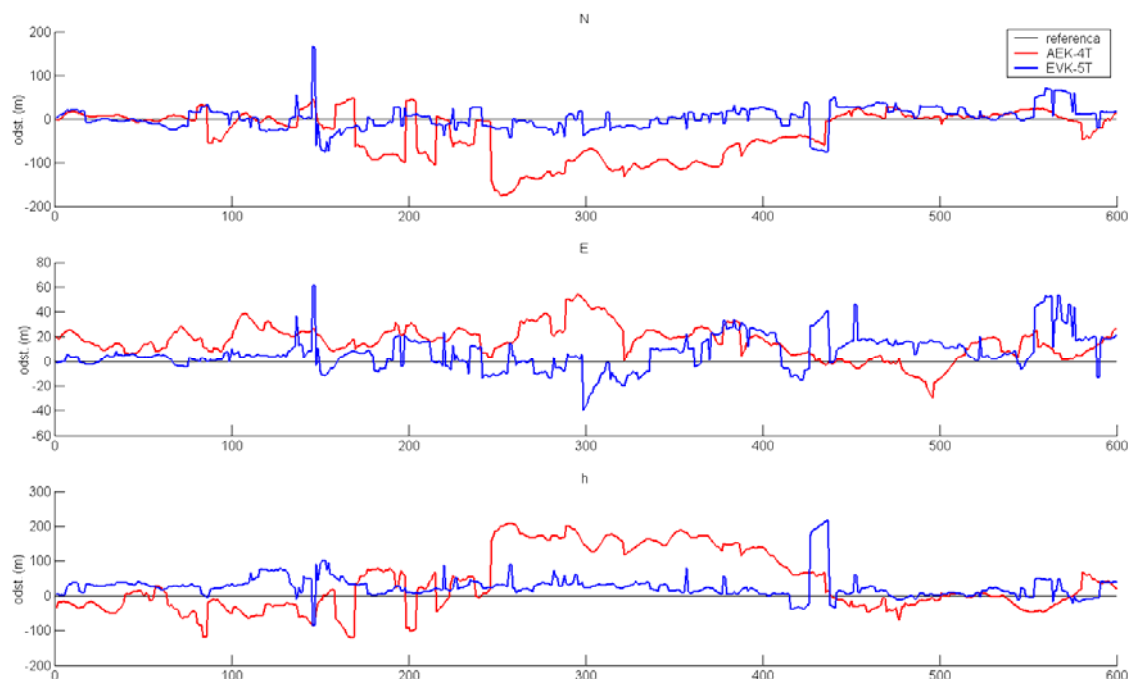
Fig 4-51: Comparison of multipath estimation with Doppler observations and VRS

Na osnovi zgornjih ugotovitev lahko sklepamo, da je možno vrednost pogreška večpotja na kodna opazovanja oceniti na osnovi Dopplerjevih opazovanj.

4.6 Primerjava sprejemnikov in anten

V raziskave smo vključili dva sprejemnika HS GPS, ki sta sicer istega proizvajalca, in dve različni anteni, eno t.i. »patch« in drugo t.i. »geohelix«. Testno opremo opisujemo v 4.2.

Novejši tip sprejemnika EVK-5T je po specifikacijah bolj občutljiv kot AEK-4T. Glede na izkušnje uporabe obeh instrumentov v različnih okoljih ni opaziti, da bi zaradi večje občutljivosti sprejemal večje število signalov. Kadar smo izmero izvajali hkrati z obema sprejemnikoma in z enakim tipom antene, je bilo število sprejetih signalov s satelitov zelo podobno, večinoma je bilo število signalov enako, kdaj jih je imel več eden, kdaj pa tudi drug sprejemnik. Glede dosežene natančnosti spadata v isti razred. Omembe vrednih razlik ni bilo opaziti. Primer osnovne obdelave kodnih opazovanj z obema sprejemnikoma prikazuje slika 4-52. Izmero znotraj objekta smo izvajali z obema instrumentoma hkrati in z enakima antenama, ki smo ju postavili eno zraven druge.



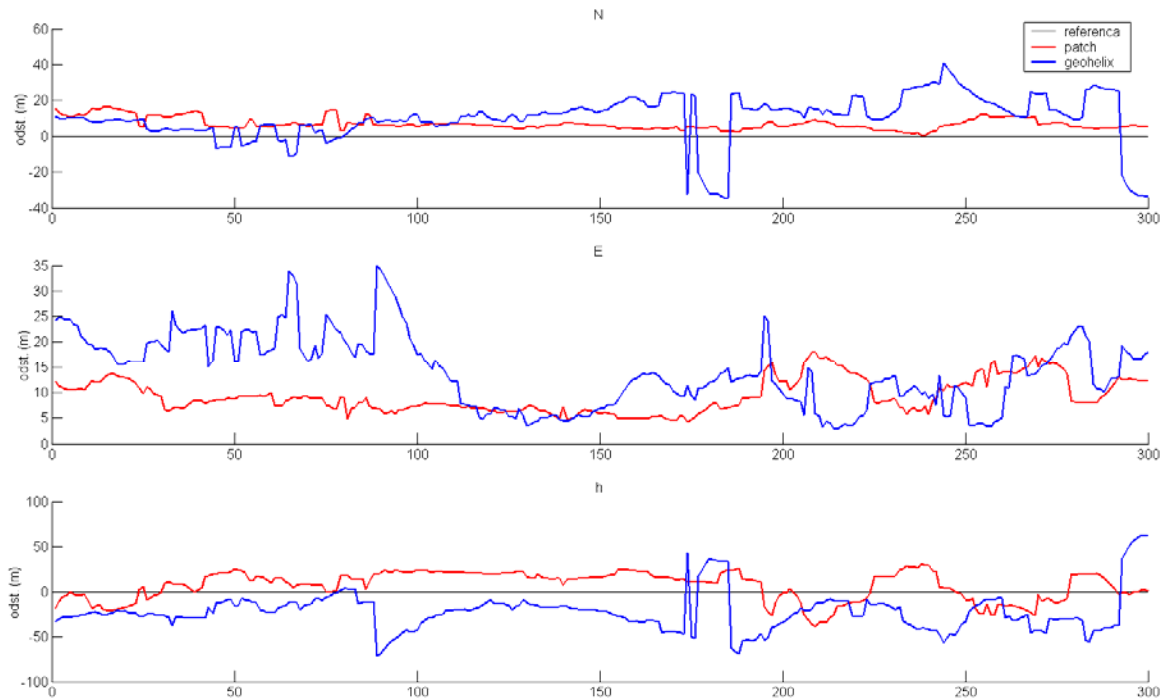
Slika 4-52: Primerjava sprejemnikov HS GPS

Fig 4-52: Comparison of HS GPS receivers

Zanimiva je primerjava ocenjenih vrednosti večpotja za oba sprejemnika. Vpliv večpotja smo ocenili s pomočjo Dopplerjevih opazovanj na način, ki smo ga opisali v 4.5. Za isto opazovanje je razpon vrednosti za npr. satelit S27 pri sprejemniku AEK-4T med -26 in +17 m, medtem ko je razpon za isti satelit pri EVK-5T med -7 in +4 m. Vrednosti za satelit S15 so med -17 in +24 m za AEK-4T ter med -5 in +4 m za EVK-5T, torej spet v korist novejšega instrumenta. Podobno velja tudi za druge primere. Očitno vsebuje sprejemnik EVK-5T v primerjavi s starejšim modelom AEK-4T boljši mehanizem za zmanjšanje vpliva večpotja. Kljub temu je nivo natančnosti za oba sprejemnika zelo podoben. Tudi rezultati obdelave kodnih in Dopplerjevih opazovanj z lastno metodo so med seboj podobni.

V testiranju smo vključili dve različni anteni, t.i. »patch«, ki spada v paket instrumenta, ter t.i. »geohelix«, ki je zaradi svoje velikosti in oblike primerna za vgradnje v manjše naprave. Za merodajno primerjavo bi morali anteni istočasno sprejemati signale in biti povezani na isti tip instrumenta, kar pa ni bilo izvedljivo. Slika 4-53 predstavlja primerjavo osnovne obdelave kodnih opazovanj s sprejemnikom EVK-5T v oteženih pogojih. Izmera je bila zaporedna,

najprej s »patch« anteno, nato še z »geohelix«. Na tem primeru so videti rezultati, ki smo jih pridobili z anteno »geohelix«, nekoliko manj točni, vendar pa je v kakšnem drugem primeru ravno obratno. V splošnem je nivo natančnosti za obe anteni enak.



Slika 4-53: Primerjava anten v oteženih pogojih

Fig 4-53: Comparison of antennas in challenging environments

5 ANALIZA DOBLJENIH REZULTATOV

V okviru raziskav pričujoče naloge smo preizkusili več različnih postopkov obdelave opazovanj GPS. Glavni namen raziskav je optimalna sestava postopkov, metod in nastavitvev za kakovostno določitev položaja osebe s pomočjo navigacijskega sistema GPS v oteženih pogojih. Za otežene pogoje štejemo tiste, kjer običajni sprejemniki GPS ne zmorejo več določiti položaja sprejemnika zaradi premajhnega števila sprejetih signalov s satelitov. Otežene pogoje lahko razvrstimo v več razredov. Za delno otežene pogoje lahko štejemo območja, kjer je število sprejetih signalov še vedno veliko, fizične ovire okoli sprejemnika pa povzročajo odboje signalov, kar vodi do pogreška večpotja. Zelo oteženi so pogoji izven objektov, kjer je velika prisotnost večpotja, vsaj nekaj signalov pa je tudi oslabljenih, ker na poti do antene prečijo katero od fizičnih ovir (les, kovina, beton, steklo, človeško telo, ...). Poseben razred oteženih pogojev so opazovanja znotraj objektov, kjer so vsi sprejeti signali oslabljeni, hkrati pa je velika prisotnost pogreška večpotja. Poseben razred so pogoji, kjer ni ovir za sprejem signalov s satelitov, prisotnost večpotja pa je zgolj občasna in še takrat v manjši meri. Kakovosten postopek obdelave opazovanj GPS mora zagotoviti visoko kakovost položaja v vseh naštetih pogojih.

Čim višjo kakovost položaja skušamo doseči z uporabo vseh razpoložljivih podatkov, ki pa jih moramo kritično oceniti in primerno uporabiti. Pri tem smo seveda omejeni z opremo, ki je na razpolago za tovrstne raziskave. Ker lahko zgolj z obdelavo podatkov surovih opazovanj GPS razvijemo svoje lastne postopke opazovanj in jih ustrezno ovrednotimo, smo torej omejeni na sprejemnike, ki imajo možnost posredovanja podatkov opazovanj. Na razpolago smo imeli zgolj dva instrumenta, ki v celoti ustrezata zahtevam. Oba instrumenta sicer sprejemata kodna, fazna in Dopplerjeva opazovanja, vendar pa eden od njiju faznih opazovanj oslabljenih signalov ne zaznava. Lasten postopek določitve položaja torej temelji na podatkih kodnih in Dopplerjevih opazovanj. Podatek opazovanj je tudi razmerje moči in šuma signala, ki kaže na oslabitev signala in ta podatek lahko upoštevamo v obdelavi opazovanj.

Kodna opazovanja so, kot smo že večkrat izpostavili, temelj za avtonomno določitev položaja. Podatki meritev so psevdo razdalje med sprejemnikom in satelitom. Psevdo razdalje so obremenjene s pogreški v položaju in urinem stanju satelita, atmosfere, večpotja ter urinega stanja in šuma sprejemnika. Sprejemnik izmeri kodne psevdo razdalje na osnovi primerjave oddane in v sprejemniku tvorjene kode nosilnega valovanja. Zaradi nizke ločljivosti kode so lahko kodne psevdo razdalje tudi ob upoštevanju atmosferskih popravkov že v normalnih pogojih pogrešene za več metrov, v oteženih pogojih, kjer je velika prisotnost večpotja, pa so pogreški psevdo razdalj lahko tudi več 10 m.

Dopplerjeva opazovanja temeljijo na t.i. Dopplerjevem efektu. Satelit oddaja signale s točno definirano frekvenco. Zaradi relativnega približevanja oz. oddaljevanja satelita od sprejemnika pride do Dopplerjevega efekta, ko se frekvenca sprejetega valovanja spremeni glede na oddano frekvenco. Sprememba frekvence je ob znani hitrosti valovanja oz. valovni dolžini merilo za spremembo razdalje med sprejemnikom in satelitom. Določitev avtonomnega položaja na osnovi zgolj Dopplerjevih opazovanj je v teoriji možna, v praksi pa zaradi omejenega števila sprejetih signalov s satelitov težko izvedljiva. Dopplerjeva opazovanja lahko upoštevamo na osnovi znanih razdalj do satelitov v nekem trenutku. Na osnovi sprememb razdalj, ki jih izračunamo z Dopplerjevim efektom, lahko izračunamo razdalje do satelitov v poljubnem trenutku. Dopplerjeva opazovanja so obremenjena z enakimi vplivi kot kodna opazovanja, ker pa jih lahko obravnavamo kot časovni odvod faznih opazovanj, imajo veliko večjo ločljivost kot kodna opazovanja, poleg tega pa zelo zmanjšano občutljivost na pogrešek večpotja.

Celotno programsko kodo z vsemi potrebnimi algoritmi za določitev položaja na osnovi opazovanj GPS smo napisali v programu Matlab. V istem programu smo tudi izrisali vse grafične prikaze.

5.1 Analiza uporabljenih postopkov

V postopek obdelave opazovanj GPS v različnih pogojih smo vključili različne obstoječe in novo razvite metode, modele in uteži s preizkušanjem različnih nastavitev. Preizkuse

posameznih uporabljenih postopkov smo opisali v 4.3. Pri vseh obravnavanih postopkih smo vpliv postopka na rezultate preverili v različnih pogojih in tudi v več primerih znotraj podobnih pogojev. Zaradi preglednosti nismo prikazali vseh rezultatov, ampak samo najbolj značilne. Primeri, ki niso predstavljeni v nalogi, kažejo podobne značilnosti kot prikazani primeri.

Namen preizkusov postopkov je določitev smiselnosti in primernosti uporabe posameznega postopka in različnih kombinacij postopkov. Končen cilj je določiti postopek, ki bo vseboval optimalno kombinacijo modelov, metod in uteži z ustreznimi parametri in bo podal kakovostno rešitev v različnih primerih in v različnih pogojih. Glede na visoko dinamiko in nepredvidljivost opazovanj v oteženih pogojih je iluzorno pričakovati, da bo izbrani postopek s svojimi specifičnimi nastavitvami prav v vseh primerih zagotavljal najboljšo rešitev. Bistvo raziskav je razvoj t.i. varnega postopka določitve položaja v oteženih pogojih, ki bo v vseh pogojih zagotavljal rezultat, ki bo čim bližje pravemu, obenem pa bo toliko »brzdak« rezultate, da le-ti ne bodo »odleteli« daleč stran od prave rešitve.

Določitev položaja sprejemnika temelji na poznavanju položaja satelitov GPS v vesolju. Sateliti se gibljejo po predvidenih tirnicah okoli Zemlje. Predviden položaj satelitov je zapisan v t.i. almanahu, ki ga oddajajo sateliti v navigacijskem sporočilu, kjer pa je tudi podatek o urnem stanju satelitove ure. Ker dejanski položaj satelita praviloma odstopa od predvidenega, lahko v obdelavi uporabimo tudi natančne efemeride, ki vsebujejo podatke o popravljenih tirnicah satelitov in popravljenem urnem teku satelitove ure. Te podatke imamo na razpolago z določenim zamikom, izjema so le t.i. »ultra-rapid« efemeride, ki imajo določen del podatkov predviden za 6 ur naprej. Ker pa je distribucija teh podatkov za izmero v resničnem času problematična, je v praksi ne izvajamo.

Z modeli ionosfere in troposfere skušamo izničiti oz. zmanjšati vpliv atmosfere na širjenje signalov GPS ob prehodu skozi atmosfero. Modele je smiselno uporabiti za vse tipe opazovanj, vse načine določitve položaja in v vseh pogojih, kar potrjujejo tudi primeri v pričujoči nalogi. V 4.3.2 in 4.3.3 opisujemo vplive modelov na posamezno opazovanje, v 4.4.3 pa vpliv uporabe modelov atmosfere na končno rešitev, t.j. položaj sprejemnika. V več primerih smo ugotovili, da atmosfera bolj vpliva na določitev višinske komponente kot na

horizontalne komponente. Razlika v horizontalnem položaju je običajno znotraj 5 m, višine pa se lahko razlikujejo tudi za več kot 35 m. Detajlne vrednosti za dva primera navajamo pri opisih slik 4-39 in 4-45, grafična primerjava višin pa je na sliki 4-40. V splošnem velja, da so višine, ki jih določimo z upoštevanjem modelov atmosfere, bližje pravim vrednostim kot višine, ki jih pridobimo brez upoštevanja modelov atmosfere. Pri enem od obravnavanih primerov je višina brez upoštevanja atmosferskih popravkov za pribl. 30 m previsoka, z upoštevanjem popravkov pa sicer nekaj metrov prenizka, a vseeno veliko bližje pravi vrednosti. Modele ionosfere in troposfere je vsekakor smiselno upoštevati pri obdelavi opazovanj GPS, tudi v oteženih pogojih.

Običajen način obdelave opazovanj je iterativna izravnava po metodi najmanjših kvadratov. Izvedeni izračuni te metode predpostavljajo normalno porazdelitev opazovanj brez prisotnosti grobih pogreškov, kar pa je pri opazovanjih GPS v oteženih pogojih zelo težko zagotoviti. V takih pogojih je tudi težko definirati grobo pogrešena opazovanja. Alternativa je uporaba robustnih statistik, ki s pomočjo utežnih funkcij dodelijo uteži opazovanjem. Poznamo več metod, v nalogi smo uporabili modificirano metodo L1-norma (glej 3.2). Metodo smo modificirali z razlogom, da v izračunu uteži ne pride do deljenja z 0. Prednost robustnih metod v primerjavi z metodo najmanjših kvadratov je manjša občutljivost na nenadne spremembe v podatkih, kar smo pokazali v 4.3.4. Izbrana robustna metoda sicer ne izloča grobih pogreškov, vendar pa potencialno grobo pogrešenim opazovanjem, ki »kvarijo« matematični model izravnave, dodeli ustrezno nizke uteži in na tak način zmanjša njihov vpliv na končno rešitev na najmanjši možni nivo.

Nekaj tipičnih rešitev določitve položaja samo s kodnimi opazovanji smo predstavili v 4.4.1. Glede uporabe kodnih opazovanj moramo izpostaviti dve značilnosti, ki nedvomno odločilno vplivajo na končno rešitev.

Določitev položaja s kodnimi opazovanji je zelo občutljiva na spremembo sestave sprejetih signalov s satelitov med zaporednimi epohami, t.j. v primeru, ko se pojavi nov satelit ali pa izgine eden od obstoječih satelitov. V oteženih pogojih se lahko zgodi tudi, da število satelitov ostane enako, vendar pa nov satelit zamenja obstoječega. V takih trenutkih je kritična predvsem določitev popravka sprejemnikove ure, saj zelo pogosto pride do velikih »skokov«

v popravku urinega stanja, kar pa načeloma ne ustreza dejanskemu urinemu teku, saj je le-ta dokaj zvezna in gladka funkcija. V grafikonih sprememb popravka ure se ti skoki kažejo kot t.i. »špice«, ki jih lahko vidimo na slikah 4-22, 4-24 in 4-25. V neoviranih pogojih lahko popravek ure »zgladimo« z robustnimi metodami, v oteženih pogojih pa tudi to ne pomaga. Nenadni odmiki popravka ure od pričakovane vrednosti so lahko večji od 80 m, kar lahko vidimo na sliki 4-24. Posledica tovrstnih »skokov« je predvsem točnost višinske komponente točke, ki se spremeni za podobno vrednost kot je vrednost odmika, lahko pa vpliva tudi na horizontalne komponente, kot npr. vidimo na sliki 4-23.

Kodna opazovanja so zelo občutljiva tudi na vpliv večpotja. V neoviranih pogojih si položaji sledijo dokaj gladko, razen v primerih spremembe sestave satelitov in pogreška v določitvi popravka sprejemnikove ure, kot smo opisali v prejšnjem odstavku. Vpliv večpotja na posamezno psevdo razdaljo lahko doseže skoraj 30 m, kot smo navedli v 4.5.

Pogrešek položaja, ki ga določimo s kodnimi opazovanji, je v veliki meri posledica večpotja signalov in netočne določitve popravka sprejemnikove ure v kritičnih trenutkih, ko se spremeni sestava sprejetih signalov. V oteženih pogojih lahko položaji povsem nenadzorovano »odletijo« daleč stran od pravega položaja. V oteženih pogojih izven objektov so odstopanja razreda nekaj 10 m, kot je primer na sliki 4-26, znotraj objektov pa lahko odstopanja presežejo 100 m, kar lahko razberemo na sliki 4-16.

Dopplerjeva opazovanja so veliko bolj stabilna od kodnih opazovanj. Seveda se moramo zavedati dejstva, da kodnih opazovanj ne moremo izključiti v celoti, kajti za določitev položaja samo z Dopplerjevimi opazovanji potrebujemo podatke o referenčnih razdaljah do satelitov v nekem trenutku. Te izračunamo iz danega položaja, če ga poznamo, drugače pa jih moramo določiti s kodnimi opazovanji.

Pri obdelavi Dopplerjevih opazovanj še vedno lahko pride do nenadnih »skokov« v popravku sprejemnikove ure, imajo pa ti popravki manjše amplitude kot pri kodnih opazovanjih. V neoviranih pogojih položaji, ki jih določimo na osnovi Dopplerjevih opazovanj, praviloma lepo sledijo poti gibanja, kot npr. vidimo na sliki 4-34 (glej točke v zeleni barvi). Oteženi pogoji pa očitno vplivajo tudi na Dopplerjeva opazovanja, kar lahko vidimo na isti sliki (glej

točke v rdeči barvi) ali na sliki 4-33. V splošnem velja ugotovitev, tudi na osnovi neprikazanih primerov, da položaji, ki jih določimo na osnovi Dopplerjevih opazovanj, praviloma dobro sledijo poti gibanja, vendar pa se zadnji izračunani položaj konča nekaj pred dejansko zadnjo točko. Videti je, kot da bi v oteženih pogojih prišlo do zmanjšanja merila izračunanih rezultatov glede na dejansko stanje. Vzrok takšnega obnašanja opazovanj je težko določiti. Podatek Dopplerjevih opazovanj je zgolj sprememba frekvence nosilnega valovanja, le-ta pa se ob prehodu skozi oviro ne spremeni. Informacij na to temo od proizvajalca testnih instrumentov nismo uspeli pridobiti.

Glede na pomanjkljivosti tako kodnih kot Dopplerjevih opazovanj je logično, da lastni postopek določitve položaja temelji na kombinaciji obeh tipov opazovanj. Bistvo postopka je torej minimiziranje slabosti posameznih tipov opazovanj, kar pa storimo z ustrezno obravnavo podatkov in uporabo dodatnih metod in uteži.

Obdelava opazovanj GPS z namenom določitve položaja poleg neznank položaja vsebuje tudi neznanke urinega stanja sprejemnikove ure. V običajnih postopkih obdelave vse navedene neznanke določamo hkrati, saj je določitev popravka ure odvisna od trenutnega položaja, določitev komponent položaja pa od popravka ure. Neznanko popravka ure in neznanke položaja lahko obravnavamo tudi ločeno. V primeru navigacije oseb to lahko storimo, saj so hitrosti sprejemnika majhne in za določitev popravka ure je končni položaj predhodne epohe zadosti točen, seveda ob predpostavki, da je časovni interval med zaporednima epohama kratek, npr. 1 s ali manj.

V primeru ločene obdelave popravka ure in položaja imamo možnost izbirati tipe opazovanj v posamezni fazi obdelave. Primerjavo rezultatov določitve popravka sprejemnikove ure za različne kombinacije tipov opazovanj na enem od primerov prikazuje slika 4-38. Tudi glede na rezultate drugih primerov je najbolj smiselno, da za določitev popravka sprejemnikove ure uporabimo samo Dopplerjeva opazovanja.

V drugi fazi obdelave torej določamo neznanke položaja na osnovi popravka ure iz predhodne faze. V tej fazi obravnavamo kodna in Dopplerjeva opazovanja. Obema tipoma opazovanj lahko dodelimo enake ali različne uteži. Več primerov v 4.4.3 kaže na splošno tendenco, da v

primeru, ko imajo kodna opazovanja večjo utež kot Dopplerjeva, pride do večje razpršenosti položajev oz. do večjih odstopanj od dejanskih položajev. V nasprotnem primeru, ko imajo večjo utež Dopplerjeva opazovanja, pa pride do veljave značilnost Dopplerjevih opazovanj v oteženih pogojih, ko se navidezno zmanjša merilo. Rezultate uporabe različnih uteži opazovanj na primeru prikazuje slika 4-37 v spodnji vrsti. Rešitev z enakima utežema je na isti sliki v predzadnji vrsti na desni strani. V lastnem postopku za določitev položaja imata oba tipa opazovanj enako utež.

V običajnih postopkih obdelave vrednosti psevdo razdalj prenašamo iz epohe v epoho. V primeru kodnih opazovanj so te vrednosti v vsaki epohi neodvisne, v primeru Dopplerjevih opazovanj pa psevdo razdalje iz predhodne epohe popravimo za vrednost spremembe razdalje med sprejemnikom in satelitom. Pogreški, ki so prisotni v psevdo razdaljah, se v takem primeru prenašajo v naslednje epohe. Rešitev je lahko tudi drugačna. Po končani obdelavi posamezne epohe pridobimo podatek o izravnanim položaju sprejemnika. Na podlagi tega položaja lahko izračunamo geometrijske razdalje med sprejemnikom in sateliti. V naslednji epohi je potemtakem osnova za izračun razdalj do satelitov prava geometrijska razdalja in ne psevdo razdalja z vsemi prisotnimi pogreški. Ker je tudi izračunani položaj obremenjen s pogreški, so seveda tudi preračunane razdalje deloma obremenjene s temi pogreški, vendar pa so ti pogreški zaradi izravnanih vrednosti manjši kot v primeru merjenih psevdo razdalj. V primeru preračuna na geometrijske razdalje se vrednost popravka sprejemnikove ure po vsaki epohi nastavi na vrednost 0. Vrednost popravka ure v naslednji epohi dejansko predstavlja spremembo popravka ure med zaporednima epohama.

V obeh fazah obdelave uporabljamo robustno statistiko L1-norma. Prvo iteracijo izravnave izvedemo po metodi najmanjših kvadratov, kajti uteži robustne utežne funkcije ne moremo izračunati, ker popravki še niso znani. V naslednjih iteracijah določamo uteži opazovanj glede na vrednosti v vektorju popravkov. Čeprav se robustna metoda v določenih primerih obdelave posameznih tipov opazovanj v oteženih pogojih ne obnese dobro, kot npr. prikazujeta sliki 4-26 in 4-33, pa v sklopu prej omenjenih postopkov deluje učinkovito, predvsem v smislu zmanjševanja vpliva slabših in grobo pogrešenih opazovanj.

Začetni položaj v vsakem primeru določamo samo s kodnimi opazovanji, saj Dopplerjevih opazovanj ne moremo vključiti, ker v začetnem trenutku še nimamo referenčnih vrednosti razdalj do satelitov. Popravek sprejemnikove ure določamo istočasno z neznankami položaja. Ob predpostavki, da začetni položaj določamo v neoviranih pogojih, v obdelavo vključimo uteži robustne statistike L1-norma. Sprejemniki HS GPS namreč za postopek zaznavanja potrebujejo močnejše signale kot potem za sledenje le-teh.

Značilnosti lastnega postopka so naslednje:

- uporaba kodnih in Dopplerjevih opazovanj (utež obeh tipov opazovanj je enaka),
- ločena določitev popravka sprejemnikove ure in položaja,
- uteži modificirane robustne statistike L1-norma v obeh fazah obdelave,
- preračun razdalj po obdelavi posamezne epohe.

V postopek obdelave lahko vključimo še dodatne uteži, kot sta npr. utež višinskega kota in utež glede na razmerje moči in šuma signala SNR. Utež višinskega kota dobro deluje v neoviranih pogojih, v oteženih pogojih pa ne, kot smo ugotovili v 4.3.5. Kot dodatna utež opazovanj v lastnem postopku se v določenih primerih obnese dobro, npr. v situaciji na sliki 4-37. Lahko pa povzroči tudi velik pogrešek v končni rešitvi, kot v primeru na sliki 4-45, kjer utež višinskega kota povzroči horizontalni premik za 20 m, višinski pa za 60 m. Uporaba uteži višinskega kota je torej zelo tvegana. Lahko malenkost pripomore k boljši rešitvi, lahko pa zelo pokvari rešitev.

Razpon uteži SNR reguliramo s parametrom m . Manjša vrednost m pomeni večji razpon, večja vrednost pa manjši razpon. Glede na to, da so v oteženih pogojih vrednosti SNR v posamezni epohi lahko zelo različne, signali z zmanjšano vrednostjo SNR pa so tisti, ki so odbiti ali gredo skozi oviro in naj bi zato manj prispevali h končni rešitvi, bi bilo logično pričakovati, da bo obdelava z upoštevanjem uteži SNR tudi v praktičnem smislu zagotovila boljše rezultate kot obdelava brez uteži SNR. Vendar pa različni primeri v 4.3.6 te domneve ne potrjujejo. Tudi primeri lastno razvite metode v 4.4.3 kažejo na to, da ob uporabi uteži SNR ne pride do pomembnega napredka v točnosti položajev ne glede na izbrano velikost parametra m , lahko pa celo pokvari končno rešitev, kot npr. v situaciji na sliki 4-43.

Postopek za določitev položaja osebe z opazovanji GPS v oteženih pogojih za sprejem signalov s satelitov temelji na lastno razviti metodi obdelave kodnih in Dopplerjevih opazovanj. Obdelava upošteva vse sprejete signale, tudi s satelitov pod nizkim višinskim kotom. V postopku obdelave upoštevamo model ionosfere po Klobucharju in model troposfere Hopfield-Niell. Drugih uteži, npr. v odvisnosti od višinskega kota in SNR, ne vključimo v postopek obdelave, saj je njihova uporaba tvegana. Lahko sicer malenkost izboljšajo rezultate, lahko pa jih tudi zelo pokvarijo.

Urino stanje sprejemnikove ure se glede na točen čas GPS običajno giblje znotraj 1 ms. Ko razlika preseže 1 ms, sprejemnik samodejno izvede t.i. ponastavitev ure. V tistem trenutku se zaradi spremenjene vrednosti urinega stanja sprejemnikove ure zelo spremenijo kodne psevdo razdalje. Če obdelava opazovanj temelji na razlikah psevdo razdalj, kot je to primer pri kombinaciji kodnih in psevdo razdalj, moramo ta premik seveda nujno upoštevati, drugače pride do ogromnih napak. Trenutek »reseta« ure ugotovimo enostavno zaradi velikih razlik v zaporedno izmerjenih psevdo razdaljah. Lastno razvita metoda v takem trenutku določi položaj samo z Dopplerjevimi opazovanji, saj na njih premik ure ne vpliva.

Pri opazovanjih v oteženih pogojih se seveda lahko pripeti, da število sprejetih signalov pade pod štiri, kar je minimum za določitev vseh neznank. V takih trenutkih bi sicer lahko prenašali t.i. Dopplerjeve psevdo razdalje sprejetih signalov, pa tudi neznanko ure bi lahko izračunali, vendar samo ob kratkem izpadu zadostnega števila satelitov. Določitev popravka ure je namreč odvisna od trenutnega položaja, če pa tega ni oz. je ta podatek star, tega izračuna ne moremo več opraviti. Podatek velja za starega že v nekaj sekundah. Tudi če bi uspeli prenesti teh nekaj Dopplerjevih psevdo razdalj do epohe, kjer bi imeli zadostno število opazovanj za določitev položaja, bi te podatke morali združiti s sveže določenimi kodnimi psevdo razdaljami, kar pa pomeni, da bi morali ustrezno ovrednotiti eno in drugo vrsto podatkov, kar bi bilo lahko zelo tvegano. V primeru izpada določitve položaja zaradi premajhnega števila satelitov naslednji možni GPS-položaj določimo na enak način kot pri vklopu sprejemnika, na osnovi merjenih kodnih psevdo razdalj.

Pri vseh kinematičnih primerih v 4.4.3 smo za primerjavo prikazali tudi rezultate interne rešitve v sprejemniku. Sprejemnik namreč na osnovi opazovanj in vgrajenega algoritma sproti

tudi sam določa svoj položaj. Sprejemnik obdelane podatke uporabniku posreduje preko standardnega zapisa NMEA. Istočasno posredovanje podatkov opazovanj in stavkov NMEA omogoča direktno primerjavo rezultatov na osnovi istih podatkov. Na sliki 4-39 so interno določeni položaji označeni z vijolično barvo, na slikah 4-43 in 4-45 pa je interna rešitev označena z NMEA. Glede na prikazane in ostale neprikazane primere velja ugotovitev, da interni algoritem nedvomno vsebuje močne filtre, saj si položaji lepo sledijo, hkrati pa velja, da vedno ne sledijo povsem točno dejanski liniji gibanja ali pa kažejo na zgostitev točk, kjer je dejansko ni, kar lahko razberemo iz primerov na navedenih slikah. Vsaj približne informacije o postopku interne obdelave nam s strani podporne službe proizvajalca testne opreme ni uspelo pridobiti.

DGPS je metoda, ki zelo učinkovito in enostavno izniči ali zelo zmanjša številne vplive na opazovanja GPS. Preko standardnega pretoka podatkov RTCM lahko metodo uporabimo tudi v izmerah, kjer želimo rezultat pridobiti takoj, v resničnem času. Poglavitna omejitev uporabe brezpogojnega DGPS je dejstvo, da je le-ta učinkovit zgolj v neoviranih pogojih (glej sliko 4-5), medtem ko v oteženih pogojih in znotraj objektov bistveno ne pripomore k boljši rešitvi, lahko pa celo pokvari rezultate (glej sliko 4-6 in 4-7).

V sklopu raziskav smo razvili postopek obdelave, ki temelji na t.i. pogojnem DGPS. Položaj v trenutni epohi določimo s tvorjenjem enojnih kodnih razlik, če so izpolnjeni določeni pogoji. Število signalov, ki imajo vrednost SNR vsaj 35, mora biti vsaj šest, obenem pa morajo biti ti signali oddani s satelitov, ki jih sprejema tudi referenčni sprejemnik. Referenčni sprejemnik je lahko dejanski sprejemnik GPS ali pa so to navidezni podatki VRS iz omrežja permanentnih postaj. Če so pogoji izpolnjeni, položaj določimo samo na osnovi opazovanj močnih signalov, ki imajo vrednost SNR vsaj 35. V epohah, kjer pogoji za DGPS niso izpolnjeni, določamo položaj z lastno razvito metodo, ki upošteva kodna in fazna opazovanja. Osnova za relativno določitev položaja je zadnji položaj, določen z DGPS. Če izmero začnemo v oteženih pogojih in DGPS ni možen, položaj določimo avtonomno s kodnimi opazovanji. Pogojni DGPS uporabimo za vse epohe, kjer so izpolnjeni pogoji za DGPS. Dodatno lahko v primeru ponovne možnosti uporabe DGPS izračunamo popravke predhodnih položajev. Za epoho, kjer lahko ponovno izvedemo DGPS, lahko izračunamo odstopanje med DGPS-položajem in relativnim položajem, ki ga dobimo z lastno metodo. Odstopanje linearno porazdelimo po

časovnem kriteriju po položajih za epohe, kjer DGPS ni bil možen. Rezultate obdelave s pogojnim DGPS so vidni na slikah 4-41 in 4-44.

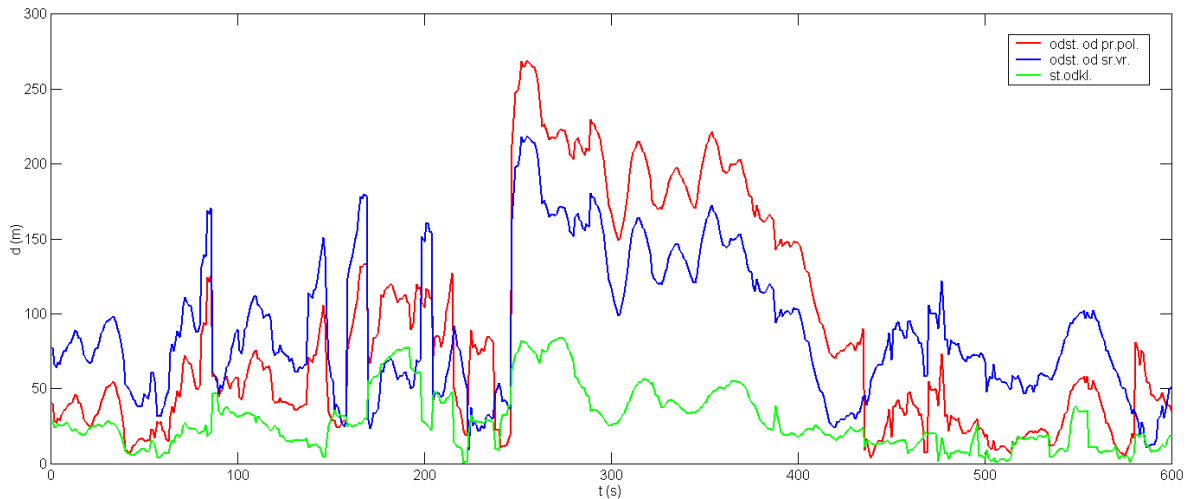
Kakovost rezultatov obdelave s pogojnim DGPS je odvisna od deleža epoh, kjer je možno uporabiti DGPS, kakovost samih položajev DGPS pa predvsem od števila močnih signalov. Če začnemo izmero izvajati na dokaj odprtem območju, lahko vsaj na začetku izmere uporabimo DGPS in so začetni položaji določeni z veliko višjo točnostjo kot v primeru avtonomne določitve. Točnost horizontalnih položajev DGPS v neoviranih ali tudi delno oviranih pogojih je v okviru 2-3 metrov. Če so vmesna obdobja, ko pogojni DGPS ni možen, zadosti kratka, npr. pod 1 minuto, lahko v splošnem dosežemo točnost položajev, tudi ko DGPS ni možen, znotraj okvirno 5 metrov, kar potrjujejo tudi primeri v tej nalogi. Višinska točnost je nekaj slabša, saj se lahko višina DGPS-položajev v zaporednih epohah spremeni tudi za več kot 5 metrov. Vsekakor je pogojni DGPS smiselno uporabiti, saj veliko pridobimo predvsem pri točnosti horizontalnih položajev. Seveda pa lahko DGPS uporabimo zgolj v primeru, če imamo na razpolago podatke referenčnega sprejemnika.

5.2 Vrednotenje rezultatov obdelave

Ustrezno oceno natančnosti rezultatov lahko podamo samo v primeru, če imamo dobro oceno natančnosti podatkov, ki jih vključimo v izravnavo. V primeru opazovanj GPS je oceno natančnosti podatkov opazovanj težko določiti že v neoviranih pogojih, v oviranih pa še toliko težje. Kadar nimamo informacije o natančnosti vhodnih podatkov, lahko natančnost ocenimo po enačbi (2-16). V primeru opazovanj GPS je standardni odklon položaja odvisen od vektorja popravkov, matrike uteži in števila nadštevilnih opazovanj. Slednje je število dejanskih opazovanj, zmanjšano za 4, kolikor je število neznank in zatorej najmanjše potrebno število opazovanj.

Slika 5-1 prikazuje primerjavo odstopanj položaja od pravega položaja (v rdeči barvi), odstopanj od srednjega položaja (v modri barvi) in izračunanega standardnega odklona (v zeleni barvi) na primeru statičnih opazovanj znotraj objekta. Vidimo lahko, da kadar »poskoči« standardni odklon, se običajno poveča tudi odstopanje, vendar pa kakšne

sistematike ali numerične povezave ni možno določiti. Podobna ugotovitev velja tudi za druge primere.



Slika 5-1: Primerjava odstopanj položaja in standardnega odklona

Fig 5-1: Comparison of position discrepancies and standard deviation

Kakovosti rezultatov obdelave torej ne moremo numerično oceniti neposredno v postopku obdelave opazovanj. Poglavitna razloga sta nepoznavanje natančnosti podatkov in zelo dinamično in spremenljivo okolje, v katerem določamo položaje točk z uporabo sprejemnikov HS GPS.

Statistično lahko opazovanja ovrednotimo samo na osnovi opazovanj na danih točkah, v primeru kinematičnih izmer pa bi morali poznati točen položaj sprejemnika za vsak trenutek. V preglednici 4-2 navajamo statistične vrednosti za izbrane rešitve izmere na točki znotraj objekta. Mera za natančnost je v tem primeru standardni odklon, mera za točnost pa RMS. Primer razhajanja ene in druge mere lahko vidimo pri višinski komponenti lastno razvite rešitve. Standardni odklon je 4,8 m, torej imajo rezultati majhno razpršenost okoli srednje vrednosti, RMS pa znaša preko 23 m, kar pomeni, da so rezultati za približno takšno vrednost odmaknjeni od prave vrednosti.

Točnost rezultatov je v primeru lastnega postopka obdelave zelo odvisna od začetnega položaja, saj nadaljnje epohe obdelujemo relativno glede na začetno epoho. Če je začetni položaj določen na odprtem območju v neoviranih pogojih, predpostavimo, da je le-ta

relativno dobro določen, ob upoštevanju dejstva, da smo ga izračunali zgolj s kodnimi opazovanji. Za dobro določen položaj velja, da je odstopanje od pravih vrednosti v horizontalnih komponentah manjši od 5 m, po višini pa je odstopanje manjše od 10 m. Večja razlika med standardnim odklonom in RMS, ki smo jo omenili v prejšnjem odstavku, je posledica prav odstopanja začetnega položaja, ki pa smo ga izmerili v zaprtem prostoru. Za primerjavo, odstopanje komponente N v začetnem trenutku je pribl. 3 m, zato imata standardni odklon in RMS podobne vrednosti (10,5 in 11,1 m).

Ob predpostavki dobro določenega začetnega položaja lahko z lastnim postopkom obdelave opazovanj GPS v oteženih pogojih pričakujemo točnost določitve horizontalnih položajev znotraj 10 m po posamezni komponenti, po višini pa znotraj 20 m. Oceno potrjujejo vsi primeri v 4.4.3, pa tudi ostali primeri. Te ocene seveda veljajo za epohe opazovanj z vsaj štirih satelitov. V delno oteženih pogojih je dosežena točnost seveda višja kot v zelo oteženih pogojih in znotraj objektov. Dosežena točnost položajev lastno razvite metode je nedvomno velik napredek v primerjavi z točnostjo osnovnega načina določitve položaja s kodnimi opazovanji. Odstopanja slednjih lahko presegajo 100 ali celo 200 m v posamezni komponenti položaja.

5.3 Neuspešni postopki

V sklopu raziskav te naloge smo preizkusili še številne druge postopke, ki jih običajno ne uporabimo pri obdelavi opazovanj GPS. Zaradi neuspešnosti jih nismo detajlno opisali in analizirali. Nekatere od njih omenjamo v naslednjih odstavkih.

Funkcijo popravkov sprejemnikove ure, ki ima posebej pri kodnih opazovanjih velike amplitude, smo poskušali »zgladiti« s Kalmanovim filtrom. Kalmanov filter temelji na primerjavi merjene in pričakovane vrednosti. Tek sprejemnikove ure je načeloma dokaj zvezen in ga načeloma lahko aproksimiramo s polinomom ustrezne stopnje. Grafikon filtriranih vrednosti je veliko bolj gladek in amplitude »špic« so zelo zmanjšane, vendar v končni rešitvi ni opaznega napredka. Je pa uporaba tega filtra lahko nevarna, saj se lahko v

daljših izmerah ob nepravilnih nastavitvah zgodi, da se izračunani položaji oddaljujejo od pravih vrednosti tudi več km.

Podobno glajenje smo skušali izvesti tudi z umetnimi nevronskimi mrežami. Le-te delujejo na principu učenja t.i. nevronov. Naučena mreža nato na podlagi podatkov izračuna rezultate. Pomanjkljivost nevronske mreže je predvsem računsko potratnost, saj bi bilo treba po vsaki epohi sprožiti novo učenje, kar pa pomeni, da metoda ni primerna za aplikacije v resničnem času. Nevronska mreža lahko ob ekstrapolaciji daje zelo pogrešene rezultate. Glede na to, da lastno razvita metoda zelo dobro oceni popravek sprejemnikove ure, sta tako Kalmanov filter kot umetne nevronske mreže povsem odveč.

Najbolj šibka točka v postopku obdelave je določitev začetnega položaja. Postopek sicer zahteva podatek o približnem začetnem položaju, ki pa je lahko zelo približen, kajti v iterativnem postopku vrednosti položaja običajno konvergirajo h končni rešitvi, ko se položaj v naslednji iteraciji spremeni za poljubno majhno vrednost. Iskanje začetnega položaja smo skušali izvesti v mreži točk, kjer smo iskali najmanjši standardni odklon. Predpostavljali smo, da bo ta najmanjši ravno v pravi koordinati točke. Če smo začetne koordinate izbrali blizu pravega položaja, je praviloma postopek vodil proti pravi rešitvi in v končni fazi bil blizu nje, ob drugačnih začetnih koordinatah pa je postopek našel nek drug lokalni minimum, ki je lahko bil zelo oddaljen od prave vrednosti.

Velike nenadne spremembe v položaju lahko omejimo z uporabo dodatnih matrik v postopku obdelave. V t.i. tranzicijskih matrikah določimo največji premik v posamezni komponenti. Če se gibljemo po ravnini, ki ima konstantno višino, npr. etaža ali streha stavbe, lahko spremembo višine omejimo na npr. 10 cm/s, medtem ko spremembo ravninskih koordinat omejimo na npr. 5 m/s. V takem primeru je grafikon višinske komponente dejansko zelo gladek in se zelo malo spreminja, tudi grafikona ravninskih koordinat sta zglajena, tudi če gre za obdelavo kodnih opazovanj. Ponovno pa se lahko zgodi, da se v daljšem časovnem obdobju izračunani položaji oddaljijo daleč stran od pravih. Tudi če ne bi prišlo do tega, je lastno razvita metoda dovolj robustna, da preprečuje nenadne skoke v položaju.

5.4 Dodatne tehnologije kot pomoč pri določanju položaja v oteženih pogojih

HS GPS je tehnologija, ki omogoča določitev položaja s satelitskimi tehnikami tudi v oteženih pogojih, do neke mere celo v notranjosti objektov. Moramo pa se zavedati, da je lahko v takšnih pogojih dosežena točnost položajev zelo degradirana, poleg tega pa je delovanje HS GPS v notranjosti objektov še vedno omejena. Kadar potrebujemo neprekinjeno navigacijo v vseh pogojih, smo prisiljeni uporabiti sistem, ki združuje več različnih tehnologij.

AGPS smo v pričujoči nalogi že omenili, in sicer v 2.5.2. Gre za pomoč pri zaznavanju signalov ob zagonu sprejemnika. Sprejemnik ob hladnem zagonu namreč potrebuje okoli 30 sekund, da zazna signale s satelitov, jih prepozna in obdela. Signal mora biti v fazi zaznavanja tudi močnejši kot potem v fazi sledenja. V fazi zaznavanja lahko torej AGPS pripomore k hitrejši rešitvi, hkrati pa sprejemniku olajša zaznavanje slabotnih signalov. AGPS je torej dopolnilo sistemu GPS za lažje zaznavanje satelitov, k višji točnosti ali razpoložljivosti v oteženih pogojih pa ne pripomore.

Sistem GPS že dolga leta povezujemo z inercialnim navigacijskim sistemom INS (angl. Inertial Navigation System) v združen navigacijski sistem GPS/INS. INS tvorijo inercialne merske enote, sestavljene iz žiroskopov in pospeškometrov na vsaki osi. Inercialni sistemi so dobro dopolnilo satelitskim sistemom v času izpada slednjih. V času delovanja obeh sistemov izvajamo kalibracijo INS, v času izpada GPS pa položaj uporabnika določamo na osnovi meritev inercialnih senzorjev. Pogreški teh senzorjev naraščajo v času preko vseh meja, zato je čas navigacije samo z INS omejen. Še posebej so občutljive enote MEMS, miniaturne in cenovno dostopne inercialne merske enote, ki pa imajo običajno zelo velike časovno odvisne pogreške. Stabilni inercialni senzorji so na drugi strani zelo dragi. Več o združevanju obeh sistemov piše npr. Kozmus Trajkovski (2009).

Pseudoliti so instrumenti, ki oddajajo podobne signale kot GPS na frekvenci L_1 , in lahko nadomestijo prave satelite GPS v notranjosti objektov. Za razliko od pravih satelitov so pseudoliti stalno nameščeni na objektu, torej je uporaba le-teh omejena na prostor, ki ga

pokrivajo. LeMaster (2003) navaja težave pri vzpostavljanju sistema psevdolitov, saj jih moramo ustrezno kalibrirati in sinhronizirati, položaj psevdolitov pa predhodno določiti z vsaj enako stopnjo natančnosti, kot pričakujemo natančnost sistema. Psevdoliti so predvsem predmet raznih raziskav, v praksi pa jih redko srečamo. Zaradi zelo omejenega območja delovanja niso primerni za splošno navigacijo.

Precej več obetajo sistemi UWB (angl. Ultra Wide Band). Valovi UWB pokrivajo zelo široko frekvenčno območje, kar pomeni zelo fino časovno ločljivost in posledično točno določitev časa sprejema signala. Quinlan (2008) opisuje sistem z imenom TRT (UK) FH UWB IPS, ki ga uporabljajo angleške gasilske brigade. Vsaka enota vsebuje UWB sprejemnik-oddajnik, ki stalno določa razdalje do ostalih enot v dosegu. Položaj vsake osebe določamo relativno glede na vse merjene razdalje v mreži. Položajno osnovo zagotavljajo zunanje enote, katerih položaj določimo z GPS ali na osnovi položaja znane točke na karti. Pričakovana položajna točnost enote v sistemu je 1 m. V splošnem je UWB kot tehnika določanja položaja še vedno mlada in nepreizkušena tehnologija. Večina obstoječih aplikacij je še v razvojni fazi, izdelkov v končni različici pa je zaenkrat še zelo malo. Tehnologija pa ima nedvomno velik potencial, še posebej v povezavi s sistemi GNSS.

V postopek določanja položaja lahko vključimo še dodatne posamične senzorje, kot so npr. barometer, digitalni kompas in pospeškometer. Za vse navedene instrumente obstaja velik kakovostni in cenovni razpon vgrajenih senzorjev. Instrumenti so lahko zelo poceni, a so zelo nestabilni in nenatančni. Na drugi strani pa so stabilni in kakovostni instrumenti praviloma zelo dragi. V postopku združevanja različnih senzorjev bi morali izbirati čim bolj stabilne in natančne senzorje, smo pa vedno omejeni s finančnimi sredstvi. Barometer je lahko v veliko pomoč pri določitvi višinske razlike med točkami oz. v končni fazi za določitev višin merjenih točk. Dodatni podatek v postopku obdelave je lahko tudi smer gibanja, ki ga poda digitalni kompas. Koristen je lahko tudi podatek o hitrosti gibanja uporabnika. Hitrost lahko izračunamo s časovno integracijo pospeška, ki ga izmeri pospeškometer. V primeru vključevanja podatkov dodatnih senzorjev moramo predhodno dobro ovrednotiti posamezne tipe podatkov meritev senzorjev. Združevanje podatkov različnih senzorjev običajno opravimo v eni od različic Kalmanovega filtra.

Poznavanje geometrije objektov, v katerih oz. v bližini katerih izvajamo opazovanja GPS, bi lahko pripomoglo k boljši rešitvi, kajti glede na znane položaje satelitov v vsakem trenutku bi lahko za vsak satelit določili, ali je v t.i. liniji vidnosti ali je signal prečkal oviro in katero oviro je prečkal. Na podlagi tega podatka bi lažje določili natančnosti oz. uteži podatkov. Vendar pa bi za ta namen morali poznati zelo točen položaj sprejemnika, npr. znotraj 10 cm, kar pa je s to opremo in obstoječimi metodami določitve položaja nemogoče doseči. Zahtevani točnosti položaja se sicer lahko približamo z DGPS, vseeno pa bi bila točnost še vedno prenizka.

----- ta stran je namenoma prazna -----

6 SKLEPNE UGOTOVITVE IN MOŽNOSTI NADALJNJEGA RAZVOJA

Poznavanje položaja kjerkoli na Zemlji je ena najbolj aktualnih tem današnje tehnične znanosti. Znanstveniki v različnih raziskavah razvijajo nove naprave, iščejo nove rešitve in skušajo doseči izboljšave obstoječih rešitev. Dandanes določanje položaja ni samo naloga in odgovornost geodetov, ampak je postala interdisciplinarna tematika, saj poleg geodezije vključuje področja telekomunikacij, elektrotehnike, fizike in matematike.

Tehnologija GPS oz. v splošnem GNSS je svetovno znana, tudi med laiki, saj se je uporaba sprejemnikov v zadnjih letih zelo razmahnila, predvsem na račun osebne in avtomobilske navigacije. Velika prednost GNSS v primerjavi z večino ostalih tehnik določanja položaja sta nedvomno časovna stabilnost in dejstvo, da dobimo podatek o položaju sprejemnika v izbranem koordinatnem sistemu takoj, ko so zagotovljeni minimalni pogoji, t.j. sprejem signalov z vsaj štirih satelitov. Pri določitvi položaja z GNSS ne potrebujemo danih referenčnih točk ali druge osnove, ki bi jo morali pridobiti z drugimi tehnologijami. Dejansko ravno GNSS predstavlja položajno referenco za večino ostalih tehnik, kot so klasične geodetske tahimetrične meritve, INS, UWB itn.

GNSS je torej nedvomno eden od osnovnih gradnikov navigacijskega sistema, ki bo deloval vsepovsod in z zadovoljivo točnostjo. Odgovor na vprašanje »Ali je GNSS lahko edini gradnik takšnega sistema?« je bil še nekaj let nazaj »Definitivno ne!«. GPS je deloval samo na odprtih območjih, že v bližini objektov je bila zmožnost določitve položaja zelo vprašljiva. S pojavom sprejemnikov HS GPS se je vse spremenilo. Kar naenkrat se je govorilo o tem, da GPS deluje tudi »znotraj«, kar je bilo pred tem nepredstavljivo. Ponovno lahko postavimo vprašanje: »Kako je pa to kar naenkrat možno?« Sateliti so ostali isti, nekaj je sicer novih, imajo pa vsi vgrajeno isto tehnologijo, signali so ostali enaki. Razlika je zgolj v sprejemnikih in načinih obdelave signala. Sprejemniki HS GPS so namreč zmožni sprejemati tudi zelo šibke signale zaradi ogromnega števila korelatorjev, imajo jih namreč nekaj 100 tisoč, v primerjavi z nekaj 10 v običajnih sprejemnikih. Dodatno omogočajo daljši čas integriranja signalov, kar pomeni nekaj 100 ms proti 1 ms pri običajnih sprejemnikih.

Signale GPS lahko torej s posebnimi instrumenti sprejemamo tudi v oteženih pogojih in celo znotraj objektov. Pred pretiranim navdušenjem pa se moramo sprijazniti z dejstvom, da je navigacija GPS znotraj objektov zelo omejena. Strehe, stene, tla, okna, vrata in pohištvo povzročajo oslabitev in odboje signalov. Signal, ki prodre v notranjost objekta, je lahko kmalu povsem zadušen ali pa toliko zadušen, da ga tudi zelo občutljivi sprejemniki ne zaznajo. Največjo oslabitev signala v klasični gradnji povzroča armirano betonska stena. Običajno sprejemnik HS GPS še zazna signal, ki gre skozi eno takšno steno, skozi dve pa ne več. V splošnem je določanje položaja z GPS omejeno na zgornje etaže, v nižjih etažah pa v bližini zunanjih sten. Ob tem moramo poudariti, da so v notranjosti objekta vsi sprejeti signali oslabljeni, velika je tudi prisotnost pogreška zaradi odbojev signala in večpotja. Posledično je lahko pogrešek določitve položaja zelo velik, tudi preko 100 m z osnovnim načinom določitve položaja. Z boljšimi metodami obdelave podatkov lahko sicer dosežemo nivo točnosti 20-30 m, kar pa še vedno pomeni dokaj omejeno rabo rezultatov. Kakšni so izgledi za naprej? Proizvajalci bodo najbrž razvili še bolj občutljive sprejemnike, ki bodo sposobni sprejemati še šibkejša signale. Glede kakovosti položaja pa to najbrž ne bo prineslo napredka. Opazen napredek v kakovosti bi lahko pričakovali, če bi uspeli sprejemniki samodejno zaznati odbite signale.

Kaj pa izven objektov, a vseeno v oteženih pogojih, kar pomeni v neposredni bližini stavb, pod napušči, pod nadstrešnicami, ali pa v gosti vegetaciji? V takšnih pogojih so sprejemniki HS GPS načeloma vedno sposobni sprejeti zadostno število signalov za določitev položaja. Vsaj del signalov se v takih pogojih odbije od bližnjih odbojnih površin in/ali so oslabljeni zaradi prehoda skozi oviro. Razpoložljivost podatka o položaju praviloma ni vprašljiva, tudi dosežena točnost položaja je pričakovano boljša kot »znotraj«. Kakšna je dejansko dosežena točnost, je odvisno od veliko faktorjev, glavni pa je sigurno vpliv večpotja, ki je odvisen od deleža odbitih signalov. Odboj signala je zelo težko odkriti. Signali GPS so sicer desnosučno polarizirani, ob odboju pa se polariteta obrne. Enkratni odboj signala bi torej lahko prepoznali na ta način. Dvakrat odbiti signal ima ponovno desnosučno polariteto in torej ta način odpade. Določeni sprejemniki imajo sicer vgrajene algoritme za zmanjšanje vpliva večpotja, popolnoma pa ga v nobenem primeru ne moremo odstraniti.

Namen raziskav v okviru te naloge je obdelava podatkov opazovanj visoko občutljivih sprejemnikov GPS na geodetski način, t.j. iz obstoječih podatkov opazovanj, ki jih posreduje sprejemnik, skušamo doseči čim višjo natančnost in točnost rezultatov. Cilj geodetske obdelave podatkov je zagotoviti visoko kakovost rezultatov, pri čemer pogostokrat slabša opazovanja izločimo iz obdelave. Pri opazovanjih GPS so to poleg očitnih grobih pogreškov tudi signali satelitov pod nizkim višinskim kotom, npr. 10 ali 15 stopinj. Lastnost sprejemnikov HS GPS pri sprejemu signalov, kot tudi pri internem izračunu položaja, je pridobiti in izkoristiti vse možne podatke, ne glede na njihovo kakovost. Sprejemnik bo izračunal položaj v vsakem primeru, če bo sprejel signale z vsaj štirih satelitov, četudi je izračunani položaj lahko zelo pogrešen.

V obdelavi opazovanj GPS v oteženih pogojih si izločanje opazovanj glede na vnaprej določene kriterije, npr. minimalni višinski kot, težko privoščimo, predvsem zaradi že tako zmanjšanega števila sprejetih signalov. V praksi se pokaže, da ima lahko posamezen signal, četudi slaboten, pomemben prispevek v končni rešitvi. Lastni postopek obdelave upošteva vsa zajeta opazovanja, z robustno metodo obdelave pa doseže, da slabša opazovanja dobijo ustrezno manjše uteži.

Glavni cilj te naloge je razvoj postopkov obdelave opazovanj GPS v oteženih pogojih, ki bo zagotovila kakovostne rezultate v okviru najvišjih pričakovanih vrednosti v takšnih pogojih. Metoda mora biti sposobna podati točne rezultate v različnih pogojih, obenem pa mora biti varna. To pomeni, da morda ne nudi vedno najboljših rezultatov, po drugi strani pa ni tvegana, katera lahko ob istih nastavitvah, ki nekje veljajo za najboljše, drugje zelo pokvari rezultate. Skozi različne primere se je kot optimalna rešitev izkazala kombinacija lastno razvite metode in upoštevanja modelov ionosfere in troposfere. Bistvo lastnega postopka obdelave je robustna obdelava kodnih in Dopplerjevih opazovanj z utežmi L1-norme, ločena določitev popravka sprejemnikove ure in položaja ter preračun razdalj po obdelavi posamezne epohe. Upoštevanje dodatnih uteži, kot so uteži višinskega kota in uteži SNR, lahko sicer v določenih primerih za malenkost izboljša rezultate, lahko pa jih tudi precej pokvari, kar smo tudi prikazali na primerih v tej nalogi. Končna rešitev zato dodatnih uteži ne upošteva. Uteži kodnih in Dopplerjevih opazovanj so enake, v fazi določitve popravka sprejemnikove ure pa uporabimo samo Dopplerjeva opazovanja.

Najbolj očitne prednosti lastnega postopka v primerjavi z običajnimi postopki so:

- robustnost rešitve – grobi in ostali večji pogoški zelo malo vplivajo na rezultate,
- določitev popravka sprejemnikove ure je brez nenadnih »skokov«, kar bi pomenilo tudi nenadne velike spremembe položaja in
- stabilnost rezultata, ki jo dosežemo s preračunom razdalj – posledica je manjša razpršenost položajev oz. manjša odstopanja od dejanskih položajev.

Točnost končne rešitve v oteženih pogojih je zelo odvisna od kakovosti določitve začetnega položaja. Ker le-tega običajno določamo s kodnimi opazovanji, na doseženo točnost položaja ne moremo dosti vplivati, ker je odvisna predvsem od merskih pogojev. Zaradi tega razloga za nadaljnje epohe lažje ocenimo natančnost kot točnost položajev. Glede na rezultate več obdelanih primerov lahko ocenimo, da z lastnim postopkom tudi v zelo oteženih pogojih in znotraj objektov, kjer je pač možno določiti položaj, dosežemo točnost položaja v okviru 20 m v horizontalnem in 30 m v višinskem smislu. V primerjavi z osnovnim načinom določitve položaja je to velik napredek. Dosežena točnost rezultatov seveda še zdaleč ni vrhunska, vendar pa ob zelo dinamičnih in spremenljivih pogojih ter številnih vplivih težko pričakujemo višjo točnost. Moramo se zavedati, da v takih pogojih diferencialni načini določanja položaja ne pridejo v poštev. Omenjena pričakovana točnost položaja je le malenkost slabša kot z običajnimi postopki avtonomne določitve položaja v neoviranih pogojih. Točnost položajev v oteženih pogojih je seveda prenizka za detajlno navigacijo, npr. da lahko nedvomno določimo prostor ali etažo, kjer se trenutno nahaja sprejemnik oz. uporabnik. To še posebej velja za nujne intervencije, kjer je kakovost podatka lahko življenjskega pomena. Dosežena točnost položaja pa je zadostna za približno navigacijo, npr. za določitev objekta, v katerem oz. v bližini katerega se nahaja uporabnik.

Povsem drugačno izhodišče dosežemo, če imamo možnost izvajati DGPS. Prvi pogoj je seveda razpoložljivost podatkov referenčne postaje. Brezpogojni DGPS v oteženih pogojih ne deluje učinkovito, veliko bolje pa se obnese pogojni DGPS, pri katerem položaje točk diferencialno določamo samo s podatki opazovanj močnih signalov, če je teh zadosti. Že samo če je DGPS možen na začetku izmere, dvignemo točnost začetnih položajev na okvirno 2 m. Če so pogoji za DGPS izpolnjeni v epohah med izmero ali na koncu izmere, te položaje

določimo z DGPS. Za vmesne točke, ki jih določimo z lastnim postopkom, pa lahko preračunamo popravke. Če intervali brez DGPS niso predolgi, lahko dosežemo točnost položaja v okviru pet metrov, kar je velik napredek glede na točnost, ki jo dosežemo z avtonomno določitvijo začetnega položaja. Če imamo možnost pridobiti podatke referenčnega sprejemnika, je seveda smiselno uporabiti pogojni DGPS.

Predstavljeni postopki in končne rešitve se nanašajo na razpoložljivo opremo, torej na sprejemnike podjetja u-blox. Žal tovrstnih instrumentov drugih proizvajalcev na prostem trgu trenutno ni. Za pridobitev splošne ocene izbranega postopka bi morali le-tega preizkusiti še z drugimi instrumenti. Trenutno torej rešitev velja zgolj za instrumente u-blox.

Področje uporabe visoko občutljivih sprejemnikov GPS je še vedno zelo neraziskano, še posebej na temo obdelave opazovanj je zelo malo javno objavljenih raziskav. V večini primerov gre za preizkušanje instrumentov v različnih pogojih. Tudi konkretnih nasvetov ali namigov s strani vodilnih svetovnih strokovnjakov na tem področju nismo uspeli pridobiti.

Potencialna možnost izboljšanja postopka določitve položaja v nadaljnjem razvoju je predvsem določitev začetnega položaja v avtonomnem načinu, saj le-ta lahko vsebuje tudi večje pogreške, ki se potem prenesejo na vse naslednje položaje. Če je npr. začetni položaj grobo pogrešen, tudi najboljša metoda obdelave nič ne pripomore h kakovosti končne rešitve. Določitev začetnega položaja nedvomno ima možnost napredka in tu bi bilo smiselno poskusiti doseči še kaj več. Naslednja potencialna možnost je eventualna kalibracija sprejemnika pri izhodu iz oteženih pogojev v neovirane pogoje. V primeru velike razlike med z lastnim postopkom določenim položajem in avtonomno določenim položajem na osnovi kodnih opazovanj bi lahko trenutni položaj ponovno izračunali kot začetni položaj. Obe navedeni možnosti elegantno reši pogojni DGPS. Če je možno izvesti DGPS za začetni položaj, je le-ta veliko bolj točen kot avtonomno določen položaj. Med samo izmero pa se DGPS izvede za vse epohe, ki izpolnjujejo pogoje za DGPS, kar dejansko pomeni kalibracijo sistema.

Glede na nezmožnost določitve položaja z GPS vsepovsod vidimo možnosti nadaljnjega razvoja predvsem v povezavi z drugimi primernimi tehnologijami, na prvem mestu z UWB.

Podobno kot HS GPS je tudi tehnologija UWB še dokaj neraziskana in nepreizkušena, menimo pa, da imata skupaj zelo velik potencial v prihodnosti, tako glede razpoložljivosti podatka o položaju kot tudi glede dosežene kakovosti položaja.

7 POVZETEK

Uporaba tehnologij GNSS se je v zadnjih letih zelo razmahnila, predvsem na račun osebne in avtomobilske navigacije. Glavni značilnosti določitve položaja na osnovi opazovanj GNSS sta časovna stabilnost položaja in takojšnji podatek o položaju sprejemnika, kadar so zagotovljeni minimalni pogoji, t.j. sprejem signalov z vsaj štirih satelitov.

Razpoložljivost rezultatov opazovanj GNSS je bila do nedavnega omejena na odprta območja, kjer na poti signalov do antene sprejemnika ni bilo ovir ali pa je teh bilo zelo malo. Z uvedbo t.i. visoko občutljivih sprejemnikov se je območje uporabe tehnologije GPS zelo razširilo, saj so ti sprejemniki sposobni določati položaj tudi v oteženih pogojih za sprejem signalov s satelitov. Visoko občutljivi sprejemniki GPS so sposobni zaznati zelo šibke signale, kar pa dosežejo z velikim številom korelatorjev in daljšim časom integriranja signalov.

Oteženi pogoji pomenijo zmanjšanje števila sprejetih signalov, vsaj del signalov je oslavljen zaradi potovanja skozi fizične ovire, signali pa se lahko pred prihodom na anteno sprejemnika odbijejo od odbojnih površin v bližini sprejemnika. Oteženi pogoji so v splošnem t.i. urbani kanjoni, gosta vegetacija in notranjost objektov. V notranjosti objektov je zmožnost določitve položaja zelo omejena, običajno na zgornje etaže in bližino zunanjih sten nižjih etaž.

Osnovne količine, ki jih sprejemniki določijo z obdelavo sprejetih signalov, so: kodna, fazna in Dopplerjeva opazovanja. Običajno poznamo tudi vrednost razmerja moči in šuma signala SNR. Na osnovi sprejetih opazovanj sprejemniki z vgrajenim algoritmom izračunajo položaj sprejemnika za vsak trenutek opazovanja. Redki sprejemniki imajo možnost posredovanja podatkov opazovanj. Uspeli smo pridobiti zgolj dva tovrstna instrumenta, oba pa sta proizvod podjetja u-blox. Namen opravljenih raziskav in preizkusov je namreč razvoj lastnega postopka za določitev položaja na osnovi opazovanj GPS.

Osnovna določitev položaja temelji na obdelavi kodnih opazovanj. Kodna opazovanja so zelo občutljiva na pogrešek večpotja, ki lahko vpliva na izmerjeno psevdo razdaljo za več 10 m. V

disertaciji predstavljamo možnost ocene vpliva večpotja na kodna opazovanja s primerjavo kodnih in Dopplerjevih opazovanj. Obdelava kodnih opazovanj je občutljiva tudi na spremembo števila satelitov med zaporednimi epohami. V trenutkih, ko se pojavi nov satelit ali kateri od satelitov zaide, pogostokrat pride do netočne določitve popravka sprejemnikove ure, ki jo poleg neznank položaja določamo v obdelavi. Posledica je netočna določitev predvsem višinske komponente položaja, lahko pa vpliva tudi na horizontalne komponente položaja.

Zaradi omejitev razpoložljive opreme nismo mogli obravnavati faznih opazovanj, smo pa obravnavali Dopplerjeva opazovanja, ki imajo zelo podobne lastnosti kot fazna opazovanja, obenem pa določene prednosti, ki še posebej pridejo do izraza v oteženih pogojih.

V opravljenih preizkusih smo preverili učinkovitost obstoječih postopkov, ki so običajni za opazovanja v neoviranih pogojih. Diferencialne metode določitve položaja, ki v normalnih pogojih zelo izboljšajo točnost položaja, se v oteženih pogojih ne obnesejo zaradi različnih merskih pogojev v okolici sprejemnikov.

Ionosfera in troposfera vplivata na širjenje elektromagnetnega valovanja ne glede na pogoje v okolici sprejemnika in jih je zato smiselno upoštevati. V postopek določitve položaja smo vključili Klobucharjev model ionosfere in kombinirani Hopfieldov-Niell-ov model troposfere. Pokazali smo, da upoštevanje modelov atmosfere izboljša točnost položaja oz. zmanjša odstopanja izračunanega položaja od dejanskega položaja.

Postopek obdelave opazovanj temelji na podatkih oddanih efemerid, ki vključujejo podatke o položaju satelitov in urinih stanjih ur satelitov. Uporabo natančnih efemerid za določitev položaja v resničnem času zelo težko izvedemo, poleg tega pa glede na pričakovano točnost položajev ne omogočijo velikega napredka v sami točnosti.

V postopkih obdelave običajno skušamo izločiti grobo pogrešena opazovanja. V primeru opazovanj v oteženih pogojih zelo težko točno določimo grobi pogrešek, saj so opazovanja zaradi različne stopnje oslabitve signalov različnih kakovosti. V lasten postopek obdelave opazovanj smo vključili robustno statistiko L1-norma, ki smo jo modificirali, da v izračunu ne

pride do singularnosti oz. deljenja z nič. Robustne metode opazovanjem dodelijo uteži glede na vrednosti popravkov v izravnavi in na tak način zmanjšajo vpliv opazovanj z večjimi pogreški.

V postopek določitve položaja lahko vključimo dodatne uteži, kot so uteži višinskega kota in uteži glede na SNR. Pokazali smo, da v določenih primerih sicer delno pripomorejo k boljši rešitvi, lahko pa povzročijo tudi velika odstopanja, zato jih v končno rešitev nismo vključili.

V okviru raziskav smo razvili lastni postopek, ki poleg robustnih metod obdelave vključuje ločeno določitev popravka sprejemnikove ure in neznank položaja. Za določitev popravka sprejemnikove ure uporabimo samo Dopplerjeva opazovanja z namenom zagotovitve čim bolj gladke funkcije popravkov, brez nenadnih anomalij, ki so značilna za obdelavo kodnih opazovanj. V fazi določitve neznank položaja obdelujemo kodna in Dopplerjeva opazovanja. Obdelava zgolj Dopplerjevih opazovanj v oteženih pogojih pogosto vodi do pojava, ko sicer položaji dobro sledijo liniji gibanja, a so položaji med seboj bližje kot bi morali biti. Ob vključitvi kodnih opazovanj v obdelavo se ta pojav praviloma izniči. Uteži kodnih in Dopplerjevih opazovanj so enake. Dodatna lastnost lastnega postopka je preračun razdalj do satelitov po obdelavi posamezne epohe. Namesto psevdo razdalj v naslednji epohi upoštevamo geometrijske razdalje med sprejemnikom in sateliti, kar dodatno prispeva k boljšim rezultatom.

Dodatna možnost, ki smo jo razvili v okviru naloge, je t.i. pogojni DGPS. Le-ta za diferencialno določitev položaja uporablja zgolj podatke opazovanj močnih signalov, če je teh zadosti. Če močnih signalov ni zadosti, položaj določimo z lastnim postopkom. Metoda omogoča tudi izračun popravkov za epohe, ko pogojni DGPS ni možno izvajati. DGPS v splošnem lahko izvajamo zgolj v primeru, če imamo na razpolago podatke opazovanj referenčnega sprejemnika. Uporaba pogojnega DGPS zelo dvigne kakovost izračunanih položajev.

Glavni cilj naloge, t.j. razvoj kakovostnega postopka obdelave opazovanj GPS v oteženih pogojih za navigacijo oseb, smo dosegli. Postopek zagotavlja rezultate z relativno dobro točnostjo. Na različnih primerih smo pokazali, da lahko pričakujemo točnost položajev v

okviru 20 m za horizontalne komponente in 30 m za višinsko komponento tudi v zelo oteženih pogojih, kadar nimamo možnosti uporabiti DGPS. Glede na pričakovane točnosti v neoviranih pogojih in dejansko slabe pogoje, v katerih izvajamo opazovanja, smatramo to kot dober rezultat. Kakovost lastne rešitve dokazujejo tudi primerjave z rezultati, ki jih izračuna vgrajena programska oprema v sprejemniku. Če imamo na razpolago podatke referenčnega sprejemnika in lahko pogojni DGPS izvajamo vsaj na začetku izmere, je točnost položajev, tudi relativno določenih, veliko boljša, saj je v primeru DGPS začetni položaj določen s točnostjo razreda 2 - 3 m.

Nadaljnje raziskave naj bi bile usmerjene predvsem v združevanje GNSS z ostalimi tehnologijami za zagotovitev neprekinjene navigacije v vseh pogojih, med katerimi kaže največje potenciale sistem UWB.

8 SUMMARY

The use of GNSS technologies has spread widely in the past years, especially due to personal and car navigation. Main characteristics of the GNSS based positioning are time stability and immediate information on the receiver's position when minimum conditions are met, i.e. the reception of the signals from at least four satellites.

Until recently, the availability of the GNSS solutions was limited to open spaces where there were either few or none physical obstacles on signals' paths. With introduction of high sensitivity receivers the areas of possible use of GPS technology have broaden since such receivers are capable to determine their position in difficult conditions for reception of the signals from the satellites. By incorporating large number of correlators and longer integration time, high sensitivity GPS receivers are able to detect very weak signals.

Challenging environments decrease the number of the signals available. Some of the signals are attenuated when passing through physical obstacles, and signals can be reflected off nearby reflective surfaces. In general, urban canyons, thick vegetation and indoors are considered as challenging environments. The capability of indoor positioning is rather limited, mainly to top floors and proximity of outside walls in lower floors.

Basic observables, determined by signal processing in the receivers, are: code, carrier phase and Doppler. The signal to noise ratio SNR is usually also known. The receivers determine their position at any moment by processing the received observations in a built-in algorithm. Few receivers are capable of transmitting raw data observations. We have managed to acquire only two such instruments, both products of the u-blox company. The purpose of the research and the tests is a development of custom procedure for GPS positioning.

Basic positioning is based on processing of code observables. Code observables are very sensible to multipath effect which can impact measured pseudo range by several 10 meters. An estimation of multipath effect on code observations by comparing code and Doppler

observations is presented in the thesis. The processing of code pseudo ranges is also susceptible to change of the number of the signals received between sequential epochs. In cases when a new signal appears or one of the signals disappears, there is often a case of false determination of receiver clock offset which is also included as an unknown in the adjustment model. The outcome is an error mainly in height determination but can also influence the determination of the horizontal components.

The processing of the observations does not include carrier phase observables due to limitations of the available equipment. However, Doppler observations are included. They have similar characteristics to carrier phase observations and some advantages, which are especially evident in the challenging environments.

The efficiency of the existing procedures which are custom for observations in normal conditions, has been evaluated in the performed tests. Differential GPS which largely improves the accuracy acquired in normal conditions is not so efficient in difficult conditions due to different conditions in the surroundings of the receivers.

The ionosphere and the troposphere impact the propagation of electromagnetic waves regardless of conditions near the receiver and should therefore be taken into account. The positioning procedure includes the Klobuchar ionosphere model and the combined Hopfield-Niell troposphere model. Taking the atmosphere models into account in fact increases accuracy of the position by decreasing discrepancies of the calculated position from the actual position.

The processing of the observations is based on broadcast ephemerides which include satellites' positions and clock offsets. The use of precise ephemerides for real time positioning is hard to achieve. Besides, the use of precise ephemerides does not result in big progress in accuracy.

The processing of data usually includes elimination of gross errors. In case of observations in challenging environments, gross errors are hard to detect due to different levels of signal attenuation which cause different qualities of the received signals. The custom developed

processing procedure includes the L1-norm robust estimation which is slightly modified in order to avoid deletion by zero. The robust methods determine the weights of observations according to the values of residuals in adjustment by which the impact of observations with gross errors is decreased.

The positioning procedure can also include additional weighting, e.g. the elevation angle weighting and the SNR weighting. Additional weighting can, in some cases, result in a better solution, but can also cause gross errors in position. Therefore, they are not included in the final solution.

The research resulted in the development of custom developed procedure which includes robust estimation of the unknowns and separate determination of the receiver clock offset and the receiver position unknowns. The determination of the receiver clock offset uses only Doppler observables aiming to assure a smooth function of the determined offsets without sudden anomalies which are characteristic for processing of code observations. The position unknowns are determined by both code and Doppler observables. The processing of Doppler observations in the challenging environments can often cause a phenomenon where the line of movement is well tracked but the scale of the path is rather changed. The incorporation of the code observation into the solution annuls the phenomenon as a rule. The code and Doppler observations are equally weighted. An additional feature of the developed solution is a recalculation of the satellite ranges after each epoch. Geometric ranges are used instead of pseudo ranges which additionally contribute to better results.

Another feature, developed in the thesis research, is the so-called conditional DGPS. The positions are determined differentially by the data from strong signals exclusively, if they are abundant. If not, the position is determined by the custom developed procedure. The method also enables calculation of the residuals for non-DGPS epochs. In general, DGPS can only be performed if the data from a reference receiver is available. The use of conditional DGPS raises the quality of calculated positions considerably.

The main goal of the thesis, the development of a quality procedure for processing GPS observations for personal navigation in the challenging environments, has been achieved. The

procedure provides results with relatively good precision. High precision in such conditions cannot be expected, especially since general DGPS cannot be used. Several cases presented demonstrate that we can expect the precision inside 20 m for horizontal components and inside 30 m for the height component, even in very difficult conditions, when DGPS is not available. Considering an expected precision in normal conditions and actually bad conditions for performing observations, the result can be considered as good. The quality of the developed solution is proved by comparing the results to results, determined by the firmware integrated in the receiver. If the data from the reference receiver is available and if DGPS can be used at least at the beginning of a survey, the accuracy of the positions, even of those relatively determined, is much higher. The accuracy of the initial position, if determined by DGPS, is within 2 - 3 meter level.

Further research should be directed toward the fusion of GPS with other technologies for seamless navigation in any conditions, of which ultra-wideband systems have the most potential.

VIRI

Amiri-Simkooei, A. 2003. Formulation of L1 Norm Minimization in Gauss-Markov Models. *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 129, Issue 1: 37-43.

ARINC 2000. Interface Control Document ICD-GPS-200 Revision IRN-200C-004. El Segundo, ZDA, ARINC Research Corporation: 160 str.

Bahrami, M. 2008. GNSS Doppler Positioning. London, University College London: 17 str.
www-research.cege.ucl.ac.uk/GNRG/pdf/Doppler_Draft_V1_MBahrami.pdf (10. 02. 2009)

Baselga, S., Garcia-Asenjo, L. 2008. Global robust estimation and its application to GPS positioning. *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 56, Issue 3: 709–714.

Bourrel, O. 2007. Monitor for a GPS receiver. Aalborg, Danska, Aalborg University: 64 str.
projekter.aau.dk/projekter/fbspretrieve/9893197/Monitor_for_GPS.pdf (03. 10. 2008)

Chen, R., Xiyin, L. 2004. Virtual differential GPS based on SBAS signal. *GPS Solutions*, Vol. 8, Nr. 4: 238-244.

Cheng, P. 1999. Remarks on Doppler-aided smoothing of code ranges. *Journal of Geodesy*, Vol. 73, Nr. 1: 23-28.

Dach, R. (ur.), Hugentobler, U. (ur.), Fridez, P. (ur.), Meindl, M. (ur.). 2007. Bernese GPS Software, Version 5.0. Bern, University of Bern: 612 str.

Dantzig, G. B. 1963. Linear Programming and Extensions. Princeton, Princeton University Press: 648 str.

El-Mowafy, A. 2009. Statistical Testing in Quality Control of GNSS Measurements. IGNSS Symposium 2009. Gold Coast, Avstralija, IGSSS: 12 str.

ignss.org/files/Paper34.pdf (11. 04. 2010)

El-Rabbany, A. 2002. Introduction to GPS: the Global Positioning System. Boston, London, Artech House: 176 str.

Erenoglu, R.C., Hekimoglu, S. 2008. An Investigation into Robust Estimation Applied to Correlated GPS Networks. Observing our Changing Earth Symposia. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: 639-644.

Filho, E. A. M., Kuga, H. K., Lopes, R. V. F. 2003. Real time estimation of GPS receiver clock offset by the Kalman filter. Proceedings of COBEM 2003. Sao Paulo, Brazilija, COBEM: 7 str.

www2.dem.inpe.br/ryfl/COBEM03_0738_Edmundo.pdf (03. 10. 2008)

Gao, G. 2007. INS-Assisted High Sensitivity GPS Receivers for Degraded Signal Navigation. Calgary, University of Calgary: 261 str.

www.geomatics.ucalgary.ca (17. 08. 2007)

Grewal, M. S., Andrews, A. P. 2001. Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB, Second Edition. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons: 401 str.

Grewal, M. S., Weill, L. R., Andrews, A. P. 2001. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, John Wiley & Sons: 392 str.

Grubbs, F. E. 1969. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. Technometrics, Vol. 11, Nr. 1: 1-21.

Hein, G., Paonni, M., Kropp, V., Teuber, A. 2008a. GNSS Indoors — Fighting The Fading, Part 1. Inside GNSS, March/April 2008: 43-52.

Hein, G., Teuber, A., Wolf, A., Thierfelder, H. 2008b. GNSS Indoors — Fighting The Fading, Part 2. Inside GNSS, May/June 2008: 47-53.

Hide, C., Moore, T., Hill, C., Park, D. 2006. Low cost, high accuracy positioning in urban environments. Journal of Navigation, Vol. 59, Issue 3: 365-379.

Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger H., Collins J. 1994. Global Positioning System: Theory and Practice, 3rd ed., Wien, New York, Springer-Verlag: 378 str.

Jaeger, R., Mueller, T., Saler, H., Schwaeble, R. 2005. Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren, Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern. Berlin, Herbert Wichmann Verlag: 350 str.

Kaplan, E. D., Hegarty, C. J. 2006. Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd edition. Boston, London, Artech House, Inc.: 703 str.

Kim, D., Langley, R. B. 2000. The Multipath Divergence Problem in GPS Carrier-Smoothed Code Pseudorange. New Brunswick, Kanada, University of New Brunswick: 3 str.
gauss.gge.unb.ca/papers.pdf/casi00.kim.pdf (20. 11. 2008)

Kirchner, M., Becker, M. 2005. The use of signal strength measurements for quality assessments of GPS observations. Darmstadt, Darmstadt University of Technology: 9 str.
www.fomi.hu/CEGRN/public/Kirchner_Becker_05.pdf (11. 04. 2009)

Klobuchar, J. A. 1991. Ionospheric Effects on GPS. GPS World, April 1991: 4 str.
gauss.gge.unb.ca/gpsworld/EarlyInnovationColumns/Innov.1991.04.pdf (03. 12. 2009)

Kozmus, K. 2002. Analiza in obdelava kinematičnih GPS opazovanj: Magistrska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 129 str.

- Kozmus Trajkovski, K. 2009. Združeni sistemi GNSS/INS za neprekinjeno navigacijo. Geodetski vestnik, letn. 53, št. 2: 239-253.
- Kuusniemi, H., Lachapelle, G., Takala, J. H. 2004. Position and velocity reliability testing in degraded GPS signal environments. GSP Solutions, Vol. 8, Nr. 4: 226-237.
- Lachapelle, G. 2004. GNSS Indoor Location Technologies. Journal of Global Positioning Systems, Vol. 3, No 1-2: 2-11.
- Lachapelle, G. 2007. Pedestrian navigation with high sensitivity GPS receivers and MEMS. Pers Ubiquit Comput (2007) 11: 481-488.
- Leick, A. 1995. GPS satellite surveying, 2nd edition. New York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore, John Wiley & Sons: 560 str.
- Lehtinen, A. 2002. Doppler Positioning with GPS: Master of Science Thesis. Tampere, Finska, Tampere University of Technology: 58 str.
math.tut.fi/posgroup/DopplerPositioningwithGPS.pdf (30. 12. 2008)
- LeMaster, E. 2003. GPS on the Web: applications of GPS pseudolites. GPS Solutions, Vol. 6, Nr. 4: 268-270.
- Linkwitz, K. (ur.), Hangleiter, U. (ur.) 1995. High Precision Navigation 95 – Proceedings of the 3rd International Workshop on High Precision Navigation. Stuttgart, University of Stuttgart: 619 str.
- Luo, X., Mayer, M., Heck, B. 2008. Improving the Stochastic Model of GNSS Observations by Means of SNR-based Weighting. Observing our Changing Earth Symposia. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: 725-734.
- Nie, G., Liu, J. 2005. Application of Geodetic Receivers to Timing and Time Transfer. Geospatial Information, Vol. 8, Issue 1: 8-13.

Qinetiq, 2005. QinetiQ Q20 High Sensitivity GPS Receiver - Demonstration Kit User Guide.
London, QinetiQ: 15 str.

Quinlan, M. 2008. Trial By Fire: Indoor Positioning When It Matters Most. Navigation News,
July/August 2008: 8-11.

Schleppe, J. B., Lachapelle, G. 2008. Tracking performance of a HSGPS receiver under
avalanche deposited snow. GPS Solutions, Vol. 12, Nr. 1: 13-21.

Schön, S., Bieleberg, O. 2008. On the capability of high sensitivity GPS for precise indoor
positioning. Proceedings of the 5th Workshop on Positioning, Navigation and
Communication. Hannover, Leibniz University of Hannover 2008: 121-127.

Schwieger, V. 2007. High-Sensitivity GPS - the Low Cost Future of GNSS ?! International
Federation of Surveyors, August 2007: 15 str.

www.fig.net/pub/monthly_articles/august_2007/august_2007_schwieger.pdf (06. 10. 2008)

Shaw, M., Sandhoo, K., Turner, D. 2000. Modernization of the Global Positioning System.
GPS World, Vol. 11, Nr. 9: 36-44.

Simsky, A., Boon, F. 2003. Carrier Phase & Doppler-based Algorithms for Real-time
Standalone Positioning. Graz, ENC-GNSS: 25 str.

www.septentrio.com/content/carrier-phase-doppler-based-algorithms-real-time-standalone-positioning (30. 12. 2008)

Sokolova, N., Forssell, B. 2007. Indoor HSGPS Receiver Performance. European Journal of
Navigation, Vol. 5, Nr. 3: 2-7.

Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P., Kozmus, K. 2006. GPS v geodetski praksi : Študijsko
gradivo. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 50 str.

Warren, D. L. M., Raquet, J. F. 2003. Broadcast vs. precise GPS ephemerides: a historical perspective. *GPS Solutions*, Vol. 7, Nr. 3: 151–156.

Weimann, F., Abwerzger, G., Hofmann-Wellenhof, B. 2007. Pedestrian Navigation in Obstructed Environments. *GPS World*, November 2007: 26-34.

Wieser, A. 2006. High-sensitivity GNSS: The trade-off between availability and accuracy. 12th FIG Symposium. Baden, FIG: 12 str.

www.fig.net/commission6/baden_2006/PDF/GPS2/Wieser.pdf (17. 11. 2009)

Wieser, A., Hartinger, H. 2006. High-sensitivity GPS: Technologie und Anwendungen. DVW-Seminar 2006. Darmstadt, DVW: 251-274.

Witchayangkoon, B. 2000. Elements of GPS Precise Point Positioning. Maine, ZDA, University of Maine: 286 str.

www.cctechol.com/uploads/167_0.pdf (03.10.2008)

Xu, G. 2007. GPS: Theory, Algorithms and Applications, Second Edition. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: 340 str.

Spletne strani ponudnikov opreme in podatkov

CODE: *www.aiub.unibe.ch/content/research/gnss/code___research/index_eng.html*

ESA: *www.esa.int*

IGS: *igsceb.jpl.nasa.gov*

Ionex: *ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/*

Omrežje Signal: *www.gu-signal.si*

Sarantel: *www.sarantel.com*

U-blox: *www.u-blox.com*